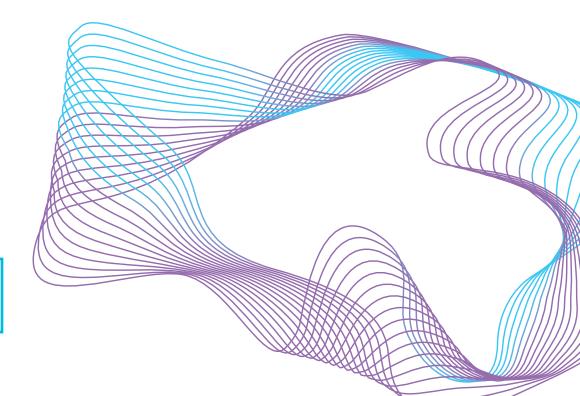
VİTMO

АЛЬМАНАХ НАУЧНЫХ РАБОТ

молодых ученых Университета ИТМО

Санкт-Петербург, 29 января - 02 февраля 2024 г.



Том 1

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО

АЛЬМАНАХ НАУЧНЫХ РАБОТ МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ Университета ИТМО

Tom 1



Санкт-Петербург 2024 УДК 004, 063, 065, 504 ББК 20, 32, 40

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. – СПб.: Университет ИТМО, 2024. – 411 с.

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Пятьдесят третьей (LIII) научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО, проходившей с 29 января по 02 февраля 2024 года, по тематикам: робототехника и искусственный интеллект, системы управления и электроинженерия, мультимедиа-технологии, дизайн и юзабилити, программная инженерия и компьютерные технологии, цифровые технологии в индустрии, фотоника и прикладная оптика, деятельность образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы", химическая инженерия, инфохимия, безопасность информационных технологий, биотехнологии.

Под общей редакцией профессора, доктора технических наук, проректора по научной работе Никифорова В.О.

ISBN 978-5-7577-0717-4 ISBN (Tom 1) 978-5-7577-0718-1



ИТМО (Санкт-Петербург) — национальный исследовательский университет, научно-образовательная корпорация. Альма-матер победителей международных соревнований по программированию. Приоритетные направления: ІТ и искусственный интеллект, фотоника, робототехника, квантовые коммуникации, трансляционная медицина, Life Sciences, Art&Science, Science Communication.

Лидер федеральной программы «Приоритет-2030», в рамках которой реализовывается программа «Университет открытого кода». С 2022 ИТМО работает в рамках новой модели развития — научнообразовательной корпорации. В ее основе академическая свобода, поддержка начинаний студентов и сотрудников, распределенная система управления, приверженность открытому коду, бизнес-подходы к организации работы. Образование в университете основано на выборе индивидуальной траектории для каждого студента.

ИТМО пять лет подряд — в сотне лучших в области Automation & Control (кибернетика) Шанхайского рейтинга. По версии SuperJob занимает первое место в Петербурге и второе в России по уровню зарплат выпускников в сфере IT. Университет в топе международных рейтингов среди российских вузов. Входит в топ-5 российских университетов по качеству приема на бюджетные места. Рекордсмен по поступлению олимпиадников в Петербурге. С 2019 года ИТМО самостоятельно присуждает ученые степени кандидата и доктора наук.

© Университет ИТМО, 2024 © Авторы, 2024

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

по направлению робототехника и искусственный интеллект

Председатель редколлегии:

Борисов Иван Игоревич, к.т.н., профессор факультета систем управления и робототехники Члены редколлегии:

Громов Владислав Сергеевич, к.т.н., доцент факультета систем управления и робототехники Ведяков Алексей Алексеевич, к.т.н., доцент, инженер факультета систем управления и робототехники

по направлению системы управления и электроинженерия

Председатель редколлегии:

Лукичев Дмитрий Вячеславович, к.т.н., доцент факультета систем управления и робототехники **Члены редколлегии:**

Демидова Галина Львовна, к.т.н., доцент факультета систем управления и робототехники

по направлению мультимедиа-технологии, дизайн и юзабилити Председатель редколлегии:

Смолин Артем Александрович, к.ф.н., доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники, директор центра юзабилити и смешанной реальности

Члены редколлегии:

Жданов Дмитрий Дмитриевич, к.ф-м.н., доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники

Меженин Александр Владимирович, к.т.н., доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники

по направлению программная инженерия и компьютерные технологии Председатель редколлегии:

Балакшин Павел Валерьевич, к.т.н., доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники

Члены редколлегии:

Белозубов Александр Владимирович, к.т.н., старший преподаватель факультета программной инженерии и компьютерной техники, ведущий инженер лаборатории компьютерной инженерии Быковский Сергей Вячеславович, к.т.н., доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники, ведущий конструктор лаборатории компьютерной инженерии

Кугаевских Александр Владимирович, к.т.н., доцент факультета программной инженерии и компьютерной техники, ведущий инженер лаборатории компьютерной инженерии

по направлению фотоника и прикладная оптика

Председатель редколлегии:

Бахолдин Алексей Валентинович, к.т.н., доцент института «Высшая инженерно-техническая икола», директор центра прикладной оптики

Члены редколлегии:

Бутылкина Ксения Дмитриевна, к.т.н., инженер отдела конференций и выставок, инженер научноисследовательского центра «Цифровые космические технологии»

Мараев Антон Андреевич, к.т.н., руководитель группы научно-технического развития

по направлению цифровые технологии в индустрии

Председатель редколлегии:

Бобцов Алексей Алексеевич, д.т.н., профессор факультета систем управления и робототехники, директор мегафакультета компьютерных технологий и управления

Члены редколлегии:

Пыркин Антон Александрович, д.т.н., профессор, декан факультета систем управления и робототехники

Кустарев Павел Валерьевич, к.т.н., декан факультета программной инженерии и компьютерной техники Заколдаев Данил Анатольевич, к.т.н., доцент, декан факультета безопасности информационных технологий

Андреев Юрий Сергеевич, к.т.н., доцент, заместитель декана факультета систем управления и робототехники

по направлению деятельность образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Председатель редколлегии:

Баранов Игорь Владимирович, д.т.н., профессор, директор образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Члены редколлегии:

Никитин Андрей Алексеевич, к.т.н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Муравейников Сергей Сергеевич, к.т.н., доцент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

Шеин Владислав Максимович, ассистент образовательного центра «Энергоэффективные инженерные системы»

по направлению химическая инженерия

Председатель редколлегии:

Успенская Майя Валериевна, д.т.н., профессор, руководитель подразделения Международная лаборатория "Smart materials", руководитель подразделения Международный научно-исследовательский институт биоинженерии

Члены редколлегии:

Неелов Игорь Михайлович, д.ф-м.н., профессор центра химической инженерии Самуйлова Евгения Олеговна, к.т.н., инженер центра химической инженерии, инженер института перспективных систем передачи данных

по направлению инфохимия

Председатель редколлегии:

Скорб Екатерина Валериевна, д.х.н., профессор научно-образовательного центра инфохимии, директор научно-образовательного центра инфохимии

Члены редколлегии:

Уласевич Светлана Александровна, к.х.н., доцент научно-образовательного центра инфохимии Муравьев Антон Андреевич, к.х.н., доцент научно-образовательного центра инфохимии Балдина Анна Андреевна, ассистент научно-образовательного центра инфохимии

по направлению безопасность информационных технологий

Председатель редколлегии:

Заколдаев Данил Анатольевич, к.т.н., доцент, декан факультета безопасности информационных технологий

Члены редколлегии:

Комаров Игорь Иванович, к.ф-м.н., доцент факультета безопасности информационных технологий Коробейников Анатолий Григорьевич, д.т.н., профессор факультета безопасности информационных технологий

Попов Игорь Юрьевич, д.ф-м.н, профессор научно-образовательного центра математики Филькова Инна Александровна, заместитель декана факультета безопасности информационных технологий

по направлению биотехнологии

Председатель редколлегии:

Бычкова Елена Сергеевна, д.т.н., доцент факультета биотехнологий

Члены редколлегии:

Хантургаев Андрей Германович, д.т.н., доцент, профессор факультета биотехнологий Кригер Ольга Владимировна, д.т.н., профессор факультета биотехнологий

ВВЕДЕНИЕ

Издание содержит результаты научных работ молодых ученых, доложенные на Пятьдесят третьей (LIII) научной и учебно-методической конференции Университета ИТМО, проходившей 29 января — 02 февраля 2024 г., по тематикам: робототехника и искусственный интеллект, системы управления и электроинженерия, мультимедиа-технологии, дизайн и юзабилити, программная инженерия и компьютерные технологии, цифровые технологии в индустрии, фотоника и прикладная оптика, деятельность образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы", химическая инженерия, инфохимия, безопасность информационных технологий, биотехнологии.

Конференция проводится в целях ознакомления общественности с результатами научных исследований, выполненных в рамках: государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, стратегии развития Университета ИТМО до 2027 года, грантов Президента РФ для поддержки молодых российских ученых, РНФ, по постановлению Правительства РФ N 218 от 9 апреля 2010 года " Об утверждении Правил предоставления субсидий на развитие кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств", по постановлению Правительства РФ № 220 от 09 апреля 2010 г. «О мерах по привлечению ведущих ученых в российские образовательные организации высшего образования, научные учреждения и государственные научные центры Российской Федерации», поддержки исследовательских центров в сфере искусственного интеллекта, в том числе в области «сильного» искусственного интеллекта, систем доверенного искусственного интеллекта и этических аспектов применения искусственного интеллекта, утвержденным постановлением Правительства Российской Федерации от 5 июля 2021 г. № 1120, государственной поддержки центров Национальной технологической инициативы на базе образовательных организаций высшего образования и научных организаций, национального проекта «Наука и университеты», национальной программы «Цифровая экономика в Российской Федерации» и по инициативным научно-исследовательским выполняемыми преподавателями, научными сотрудниками, молодыми учеными, аспирантами, магистрантами и студентами Университета, в том числе в содружестве с предприятиями, организациями Российской Федерации, а также международными сообществами для увеличения эффективности научно-исследовательской деятельности и подготовки кадров и специалистов высшей квалификации.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Робототехника и искусственный интеллек
Робототехника и искусственный интеллект

УДК 004.896

FEW-SHOT VISUAL ANOMALIES DETECTION IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS FROM QUADCOPTERS ON-BOARD SENSORS

Bassel Alshawareb¹ Scientific Supervisor – Dr. Of Science, Professor Kolyubin S.¹

1 – ITMO University

e-mail: balshawareb@itmo.ru, s.kolyubin@itmo.ru

Vision-based deep learning detectors have shown high potential for detecting industrial defects for inspection. However, when deploying detectors on a quadcopter, they fail to recognize defects due to the variability of inspection conditions. This work has investigated the effect of different conditions, encountered by a quadcopter, on the mean average precision of the detector. The results show that the models Faster RCNN, DKAN [1] and FSCE [2] are not robust to inspection conditions and cannot be relied on for inspection from a quadcopter.

Keywords

Defect detection, drone inspection, few-shot learning, fine-tuning, Faster RCNN, DKAN, FSCE, knowledge distillation.

Using quadcopters to perform inspections instead of humans eliminates safety and reachability concerns. A common approach used to perform inspection on a quadcopter is using a camera to detect defects using a deep-learning based object detection model. In order for the model to identify defects correctly, we must consider the conditions of the training data. First defects occur in a very small amount, which makes it difficult to generalize. Second, new types of the defects emerge from time to time, providing the model with even smaller data. In this case, the model is expected to update its weights and identify the new types of defects. Furthermore, a serious issue arises when using a camera mounted on a quadcopter to perform inspection: different light exposure, shadows and reflections, which blocks some of the visual properties of the defect. Moreover, a defect can be located in various angles with respect to the camera, requiring the model to identify rotated objects, which is challenging for CNNs. This work aims to analyze two common object detection models: FSCE, and DKAN. The analysis performance measurement on rotated objects, with the arising of new defect types. In addition, it provides an analysis of the robustness of DKAN against different environmental conditions, containing different degrees of light exposure, blur, and rotations.

Few-shot learning, a training setting used when data is scarce, is a suitable setting for defect detection. The property of learning new emerging defects falls under the category of continual learning. Considering that, a two-stage training pipeline is used in both FSCE, and DKAN models. At the first stage, the model is trained on an abundant amount of data, called base data. This data represents the original defects in the dataset. At the second stage, the model is fine-tuned on data of the new defects, which is called novel data. The general training pipeline is shown in figure 1.

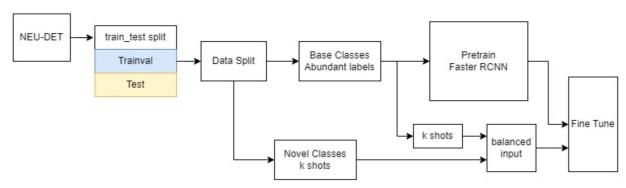


Fig. 1. Pipeline of the two-stage few-shot learning setting

One way to fine-tune a model is to retrain its weights on novel classes. However, this causes the model to forget base data as it overfits novel data, a phenomenon that is called catastrophic forgetting. This behavior was verified in the conducted experiments. To reduce overfitting in the second stage, one mixes novel classes with base classes s.t. every class has the same number of samples (shots). FSCE utilizes this approach with an expanding similarity-based classifier head, which is used at the second stage. DKAN expands on this method by using knowledge distillation [3]. Both DKAN and FSCE are based on Faster RCNN [4].

In the experiments conducted in this work, I start by optimizing Faster RCNN at the first stage for different learning rates. Then, I fine-tune Faster RCNN at the second stage based on three approaches: simple retraining, DKAN, and FSCE. The performance of the model is measured before and after applying small rotations, imitating the angle from a quadcopter. Then I pick the model with the most stable performance (DKAN) to verify its robustness to the conditions of inspection (from now on referred to as modifiers). The modifiers used in the experiments are blur, light exposure, and rotations. The performance of DKAN is analyzed with and without applying modifiers during training. The dataset used for experiments is NEU-DET, which is an open source dataset for surface defects of the hot-rolled steel strip. The dataset contains 6 types of defects: rolled-in scale, patches, crazing, pitted surface, inclusion, and scratches. The dataset contains 300 samples of every class. In all the experiments, 60 samples are used for testing, while the number of training samples varies among experiments.

During the first stage of training, it is important to optimize the performance on Faster RCNN, since its weights will be used as the prior of the model at the second stage. After repeating the training for different learning rates, a learning rate of 0.01 was chosen, as it showed a mAP of 0.64. Learning rate with higher values than 0.05 caused gradient explosion. The results of this experiment are shown in Figure 2. This trained model is used for all the following experiments.

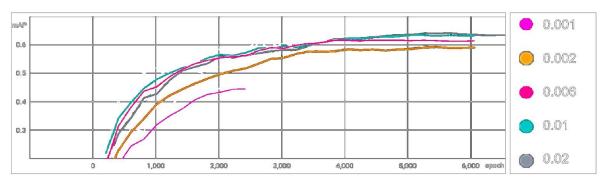


Fig. 2. mAP of Faster RCNN trained on base classes for different learning rates. Each color corresponds to a specific learning rate

In the second experiment, the models are fine-tuned on 10 shots of novel classes. The results are shown in Figure 3. The catastrophic forgetting phenomenon was observed in this experiment, where the model's performance gets worse on base classes as it learns novel classes. The objective of this experiment is to choose a model with the smallest degradation in performance on base classes, while having acceptable improvement in performance on novel classes.

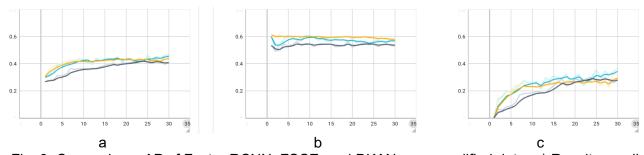


Fig. 3. Comparing mAP of Faster RCNN, FSCE, and DKAN on unmodified data: a) Results on all classes; b) Results on base classes; c) Results on novel classes. Yellow, light blue, and dark blue indicate DKAN, FSCE, and Faster RCNN respectively

This experiment shows that fine-tuning Faster RCNN by retraining it on novel classes causes the largest drop among the models. Learning novel classes was fast, but it led to a fast degradation for base classes. The other models show a smaller effect of catastrophic forgetting, where DKAN shows the best result. Additional training sessions were conducted to analyze the performance of the models when applying rotations during training and testing. The rotations are applied randomly from a range of [15, 30] degrees. Figure 4 shows the results.

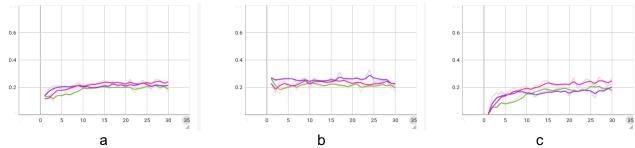


Fig. 4. Comparing mAP of Faster RCNN, FSCE, and DKAN on unmodified data: A) Results on all classes. B) Results on base classes. C) Results on novel classes. Purple, pink, and green indicate DKAN, FSCE, and Faster RCNN respectively

It was observed that FSCE shows the highest mAP for novel classes, but its performance on base classes is close to the performance of the retrained Faster RCNN. DKAN shows less drop for base classes, but average performance on novel classes. More numerical results are shown in Table 1.

Table 1 mAP of Faster RCNN, FSCE, and DKAN with and without applying modifiers. The last three columns indicate the results on base classes, novel classes, and all classes together

Model	Modifiers	mAP Base	mAP Novel	mAP ALL
Easter DCNN	No	0.55	0.38	0.45
Faster RCNN	Yes	0.21	0.25	0.23
FSCE	No	0.57	0.35	0.46
FSCE	Yes	0.22	0.3	0.26
DKAN	No	0.56	0.35	0.45
	Yes	0.28	0.22	0.25

Since the performance varies with the number of training epochs, the values in Table 1 are chosen for every model separately in the epoch of the highest mAP of all classes together.

While the performance of the models is acceptable in the nominal setting, it suffered from a sharp drop after modifiers were applied. Based on this experiment, the DKAN model showed the highest reserve of performance on base classes, and therefore was used in the following experiments. To investigate the robustness of the model for modifiers, blur, light exposure, and rotations were applied with three different difficulty levels. Easy, medium, and hard levels correspond to ranges of [15-30], [30-60], [60-90] for rotations, [10-15], [15-20], [20-25] for blur, and [0-0.2], [0.2-0.4], [0.4-0.6] for exposure. Exposure was applied in both positive and negative values. The results of the experiment are depicted in table 2.

mAP of DKAN on different levels of difficulties of the modifiers

Table 2

Modifier	Easy 30%	Medium 60%	Hard 90%
blur	0.62	0.44	0.33
rotations	0.25	0.17	0.14
exposure	0.64	0.57	0.50
blur, exposure, and rotations	0.22	0.09	0.04

A large drop in the performance was observed when rotations were applied. The easiest level of rotations, representing a range between 15 to 30 degrees, shows unreliable performance. The model shows better robustness to the other 2 modifiers, with exposure having less influence than blur. The mAP drops further as the difficulty of the modifier increases. When applying all modifiers together, the mAP gets to zero as the difficulty reaches its highest level. As an attempt to improve the performance of the model, another experiment is conducted, where DKAN is trained on the easy level of the modifiers. The results are shown in Table 3.

Table 3 mAP of DKAN on different levels of difficulties of the modifiers, after the easy level of modifiers was applied during training

Modifier	Easy 30%	Medium 60%	Hard 90%
blur	0.58	0.61	0.6
rotations	0.24	0.16	0.15
exposure	0.54	0.53	0.47
blur, exposure, and rotations	0.26	0.20	0.15

The results showed high robustness to blur with all different difficulties. When exposure was applied, the model showed a slightly lower performance, while the drop is higher for rotations. The zero-convergence observed earlier when applying all modifiers together was canceled when the model was trained on modified data. All previous experiments showed that FSCE and DKAN suffer from low robustness to quadcopter conditions for inspection. Therefore, they cannot be deployed for defect detection. Training these models on modified data does not improve the performance enough to rely on it. To improve the robustness of object detectors, other methods which do not use CNNs as a backbone can be considered in future work.

References

- 1. Chen L., Yu C., Chen L. A New Knowledge Distillation for Incremental Object Detection // 2019 International Joint Conference on Neural Networks (IJCNN). 2019. Pp. 1–7. DOI: 10.1109/IJCNN.2019.8851980.
- 2. Wang X., Huang T., Darrell T., Gonzalez J., Yu F. Frustratingly Simple Few-Shot Object Detection. 2020.
- 3. Hinton G., Dean J., Vinyals O. Distilling the Knowledge in a Neural Network. 2014. Pp. 1–9.
- 4. Ren S., He K., Girshick R., Sun J. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2017. Vol. 39. №. 6. Pp. 1137–1149. DOI: 10.1109/TPAMI.2016.2577031.

УДК 004.89

ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО ВЕКТОРА ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ДАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ЖУРНАЛИРОВАНИЯ

Муратов С.Ю.¹ (аспирант) Научный руководитель – к.т.н., доцент Муравьёв С.Б.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: symuratov@itmo.ru

В работе представлен процесс формирования единого вектора признаков для данных систем мониторинга и журналирования. Приведено описание типа данных – логов, а также систем по работе с ними. Разобрана база знаний логов – Loghub. Единый вектор признаков получен путём извлечения признаков, семантического анализа логов и вычисления значимости признаков для ансамбля моделей обнаружения аномалий.

Ключевые слова

Машинное обучение, обнаружение аномалий, извлечение признаков, логи, системы мониторинга и журналирования.

Основной архитектурный компонент обеспечения безопасности озера данных — Global Monitoring Tool (GMT) в ходе аудита информационной безопасности имел следующие результаты, представленные на рисунке 1, на период предыдущего этапа исследования [1, 2].

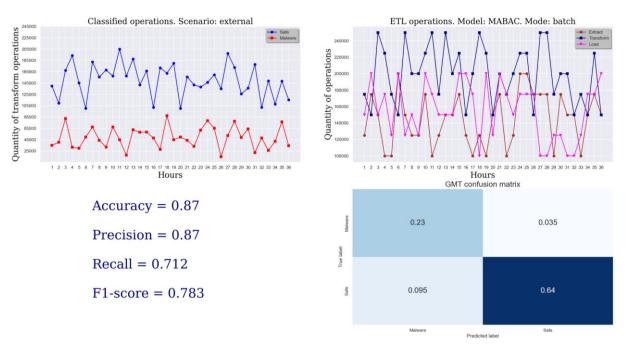


Рис. 1. Дашборд из выборки результатов аудита GMT

Одним из ключевых результатов и, одновременно, мотивационным фактором последующих этапов исследования является величина ошибки второго рода. Её величина в среднем от 3% до 3,5% является неприемлемой для промышленной эксплуатации GMT. Следовательно, необходимо провести ряд модификаций для улучшения качества GMT. Проведенный анализ результатов аудита выявил существенный недостаток — чрезмерно высокую адаптацию к наборам данных по причине отсутствия реализации методов извлечения

признаков из логов, что делает невозможным внедрение GMT в любую систему, генерирующую логи. Модификации по работе с признаками разделены на три этапа:

- 1. Формирование единого вектора признаков.
- 2. Извлечение признаков для наборов данных по заданному вектору.
- 3. Автоматизация формирования набора данных для обучения, тестирования и валидации GMT. В данной работе описан первый этап формирование единого вектора признаков, то есть такого набора признаков, при котором возможно привидение признакового пространства

такого набора признаков, при котором возможно привидение признакового пространства исходного набора данных к целевому без потери общности и семантической значимости логов. Возможность формирования такого вектора обоснована природой логов.

Логи – совокупность файловых объектов, в которые поступает объективная информация о процессах, протекающих в системе. Запись происходит за счёт программных компонент, управляющих внутренней частью системы. Каждый лог-файл – исходный журнал событий системы, из которых посредством систем мониторинга, например Zabbix или Prometheus, формируется динамическое описание состояния целевой системы.

Логи — единственные в своём роде данные, процесс создания которых полностью синтетический. В отличие от текстов, звуков, изображений и видео логи не имеют натурального происхождения. Все логи создаются различными системами: от устройств IoT до аппаратных компонент ЦОД, от прокси-сервера до гетерогенной распределенной системы хранения данных.

Наиболее релевантная и репрезентативная база знаний логов — Loghub от Logpai. Loghub содержит коллекцию системных журналов, которые находятся в свободном доступе для исследований в области аналитики журналов на основе искусственного интеллекта. Некоторые из журналов являются производственными данными, полученными в ходе предыдущих исследований, другие собраны с реальных систем в нашей лабораторной среде. Там, где это возможно, журналы не дезинфицируются, не анонимизируются и не модифицируются какимлибо образом. Эти наборы данных журналов находятся в свободном доступе для исследовательской и научной работы [3, с. 4].

На данный момент передовыми системами обнаружений аномалий в логах являются решения зарубежных облачных провайдеров: Amazon Web Services и Microsoft Azure. Данные решения – AWS CloudWatch и Azure Anomaly Detector, их структура представлена на рисунках 2 и 3. Особенностью решений является конечный состав метрик, по которым формируется решения об обнаружении аномалий. В таком случае логи формируются на уровне облачного сервиса, что максимизирует общность применения и множество сценариев эксплуатации. Однако, такие решения сложно использовать в замкнутом сетевом контуре в силу недоступности ряда ключевых компонент. Более того, в связи с экономическими санкциями на территории России недоступны услуги AWS и Azure корпоративного уровня. Альтернативных решений как среди инструментов с исходным кодом, так и у отечественных облачных провайдеров на текущих момент нет. Существующие проприетарные системы мониторинга имеют механизмы обнаружения аномалий, но они реализованы для специализированных систем, то есть общность применения таких решений ограничена.

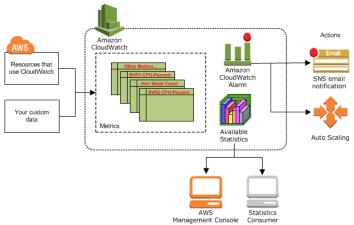


Рис. 2. Схема работы AWS CloudWatch

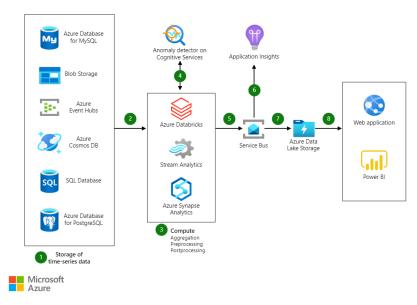


Рис. 3. Схема работы Azure Anomaly Detector

Процесс извлечения признаков реализован посредством модификации метода, описанного в статье об обнаружении аномалий в ЦОД. За основу взят тот же принцип шаблонизации записей журнала, представленный на рисунке 4 [4, c. 5].

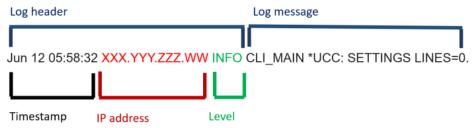


Рис. 4. Шаблонизированный образец записи журнала службы puppet-agent

Далее проведено обогащения шаблонов таким образом, чтобы процесс шаблонизации стал доступен и для логов, размещенных в Loghub. Следовательно, стало возможно преобразование заголовка журнала в заголовок набора данных по извлеченным признакам, изображенный на рисунке 5.

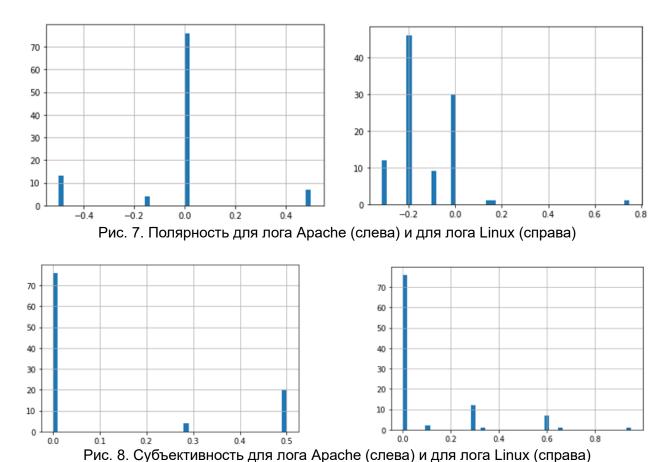


Рис. 5. Пример заголовка журнала, преобразованного в заголовок.csv

Благодаря преобразованию получены наборы данных по заданным признакам. Далее проведен семантический анализ: построены облака слов, решены задачи полярности и идентификации субъективности. Примеры представлены на рисунках 6—8.



Рис. 6. Облака слов для лога Apache (слева) и для лога Linux (справа)



В результате семантического анализа подтверждена гипотеза о возможности формирования единого вектора признаков для логов, так как логи максимально объективны, нейтрально полярны и содержат синтетические созданные языковые конструкты с вариативным

количеством пользовательских сообщений.

Формирование вектора происходило за счёт вычисления значимости признаков для моделей обнаружений аномалий: one class SVM, isolation forest, local outlier factor. Пример результата вычислений представлен на рисунке 9.

Установлен средневзвешенный порог значимости признака посредством добавления весовых коэффициентов к каждому признаку последовательно, что позволило отобрать наиболее значимые признаки и сформировать единый вектор в общем виде, вектор изображен на рисунке 10. Вектор разделен на поля признаков: статические, полустатические и динамические. Разделение на основе степени изменяемости данных в логах и в выборках из них по заданному признаку, например временному интервалу, субъекту системы, процессу.

Сформированный вектор является результатом первого этапа модификации работы с признаками для GMT. По заданному вектору возможна унификация процесса извлечения признаков для логов любых систем и его дальнейшее включение в автоматическую работу GMT, в основе которой заложена методология автоматического машинного обучения.

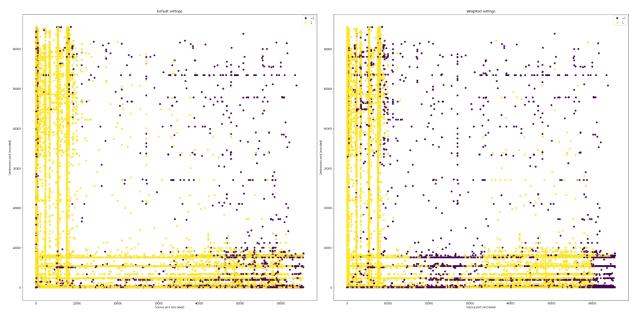


Рис. 9. Значимость признака «port» без весовых коэффициентов (слева) и с весами (справа)

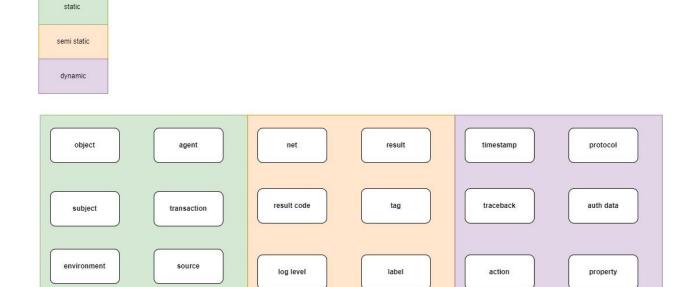


Рис. 10. Единый вектор признаков для логов

Список использованных источников

- 1. Муратов С.Ю., Лукашин А.А. Разработка архитектуры фреймворка защищённого озера больших данных // Современные технологии в теории и практике программирования. Сб. материалов конференции. 2022. С. 167–168.
- 2. Муратов С.Ю. Архитектура фреймворка защищённого озера больших данных // Альманах научных работ молодых учёных Университета ИТМО. 2023. Т. 1. С. 112–117.
- 3. Zhu J., He S., He P., Liu J., Lyu M.R. Loghub: A Large Collection of System Log Datasets for AI-driven Log Analytics. 2020. arXiv:2008.06448.
- 4. Ronchieri L.V.E., Cavallaro C. Combining Log Files and Monitoring Data to Detect Anomaly Patterns in a Data Center. Computers. − 2022. − №. 11. − P. 117. DOI: 10.3390/computers11080117.

УДК 004.896

РАЗБОР ПОДХОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НЕИЗВЕСТНОГО ОКРУЖЕНИЯ

Топольницкий $A.A.^{1}$ (студент) Научный руководитель — д.т.н., профессор Колюбин $C.A.^{1}$

1 – Университет ИТМО

e-mail: 371836@niuitmo.ru. s.kolyubin@itmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №53076 «Исследование и программная реализация адаптивных основанных на данных методов моделирования и проектирования мобильных роботов и их формаций».

В работе исследуются современные методы картирования заранее неизвестного окружения с помощью мобильных робототехнических систем. Рассматриваются подходы двух видов: использующие понятие взаимной информации для изучения окружения и использующий иерархический подход к его изучению.

Ключевые слова

Активное обучение, взаимная информация Шеннона, картирование неизвестного окружения, планирование пути на основе информации, октодерево, семантическая сегментация.

Во многих прикладных задачах, решаемых с помощью мобильной робототехники, предполагается, что робот взаимодействует с неизвестной средой и в рамках своего взаимодействия составляет карту окружения. Для ускорения процесса картирования существует ряд современных подходов, объединить которые можно в одну категорию под названием оптимальное картирование. Под оптимальным картированием понимается задача исследования неизвестной среды в автономном режиме с рядом ограничений, в качестве которых могут выступать время миссии, пройденный путь, величина исследованной площади или объёма в единицу времени, количество остановок, средняя скорость движения и другие.

За последние годы данное направление получило широкое развитие, поскольку спектр задач, которые можно решить с помощью мобильных роботов, становится шире, а значит и диапазон сред, в которых робот выполняет целевую задачу, возрастает, как и увеличиваются размеры среды, с которой взаимодействует робот. Из-за ограничений как на вычислительные ресурсы и объёмы памяти, которые можно разместить на мобильных роботах, так и на размеры и мощность самих мобильных систем предварительная загрузка всего предполагаемого окружения перед выполнением каждой миссии является крайне трудозатратным подходом, который при этом ограничивает функциональные возможности робота.

Существует ряд решений, которые обеспечивают исследование окружения в оптимальном режиме, однако они не лишены недостатков. Среди таких методов можно выделить два основных подхода: FUEL [1] и MBP [2]. У подхода под сокращённым названием FUEL, от Fast UAV ExpLoration, для изучение неизвестного окружения предлагается использовать структуру данных под названием «Информационная структура фронтиров». Фронтир — это набор ячеек карты на границе между исследованной и неисследованной областью. Для робастности и ускорения работы алгоритмов обычно предлагается ячейки объединять в кластеры. Информационная структура фронтиров содержит в себе следующую информацию:

- информация о координатах ячеек, принадлежащих одному кластеру;
- информация о центре данного кластера;
- информацию о границах в виде bounding box;
- предполагаемые точки обзора, находясь в которых квадрокоптер способен полностью исследовать данный фронтир;

матрица расстояний до следующих кластеров фронтиров из каждой предполагаемой точки обзора.

На основе данной структуры решается задача коммивояжера, происходит оптимизация пути с помощью сплайнов и строится траектория исследований. Обновление информационной структуры фронтиров в процессе исследования окружения позволяет проводить перепланирование траектории с ростом исследованной зоны. Главным недостатком данного метода является плохая масштабируемость решения — по результатам, предоставленным авторами, и по собственным апробациям алгоритм справлялся хорошо на картах размером 20 на 20 метров, однако при попытке увеличить карту в полтора раза алгоритм отрабатывал значительно дольше, при этом многие участки карты посещались несколько раз.

Другим известным методом является MBP, Motion primitive-based planning, который использует быстро исследующий случайный граф для построения глобальной траектории и быстро исследующее случайное дерево для построения локальной траектории на основе примитивов движения, что позволяет получать гладкие локальные участки траектории. Из недостатков данного метода можно выделить его неспособность строить траекторию в окружении, бедном на отличительные признаки, например многоэтажная парковка, при исследовании которой робот практически полностью останавливается.

Сначала рассматриваются два подхода, которые для изучения неизвестного окружения используют понятие взаимной информации и новизны. Затем будет рассмотрен иерархический подход.

В работе SSMI [3], от Semantic octree mapping and Shannon Mutual Information, рассматривается подход на основе использования взаимной информации Шеннона. Целью подхода является построение карты m, состоящей из ячеек, каждая из которых ассоциируется с категорией объекта из набора K. В общем случае взаимная информация — это количество информации, содержащееся в одной случайной величине относительно другой. Для планирования оптимального пути в качестве функции потерь выступает отношение взаимной информации между картой и набором будущих измерений к затратам на перемещение. Формулой функция потерь выглядит следующим образом:

$$\max_{u_{t:t+T-1}} \frac{I(m; Z_{t+1:t+T} \mid Z_{1:t})}{J(X_{t:t+T-1}, u_{t:t+T-1})},\tag{1}$$

где J — это функция стоимости перемещений под действием системы управления u из точки в момент во времени t до конца маршрута; T — это горизонт планирования перемещения; I — количество взаимной информации между картой m и наборами измерений Z. Для получения набора будущих измерений, который на момент времени t неизвестен, то есть набора $Z_{t+1:t+T}$, используется Байесовский вывод, позволяющий на основе выборки сделать обобщение обо всём наборе данных, в данном случае на основе предыдущих измерений сделать предположение о будущих измерениях.

Для каждой ячейки карты $p_t(m_i)$ вводится вектор логарифмов шансов в следующем виде:

$$h_{t,i} = \left[\log \frac{p_t(m_i = 0)}{p_t(m_i = 0)} \dots \log \frac{p_t(m_i = K)}{p_t(m_i = 0)}\right]^T \in R^{K+1},$$
(2)

где $p_t(m_i = 0)$ представляет собой порог принадлежности ячейки к какой-то конкретной категории из всего набора. Данный вектор представляет собой вектор логарифмов того, что ячейка m_i принадлежит конкретной категории. Затем на основе этого вектора и с помощью многопеременной логистической функции можно рассчитать распределение для каждой клетки.

В данном подходе весь мир представляется в виде октодерева, то есть дерева, имеющего ровно 8 потомков у каждого узла. Один узел является одной ячейкой карты, и в узле хранится информация как о занятости узла объектом одной из категорий, так и его вектор шансов. Если у 8 потомков распределение по категориям одинаковое или слабо отличается, то проводится процедура обрезки дерева, при которой родительскому узлу передаётся усреднённый вектор шансов его потомков, что позволяет сократить расчёты. На рисунке 1 приведён пример

семантического октодерева. Каждый цвет представляет собой разные категории объектов, принадлежность к которой у узла определяется с помощью вектора логарифмов шансов.

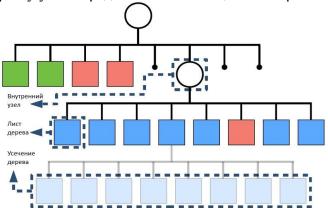


Рис. 1. Семантическое октодерево

В итоге получается семантическая карта мира, которая постепенно обновляется в процессе исследования мобильным роботом окружения. Для исследования окружения робот выбирает такую траекторию, которая соответствует условию (1).

Следующим подходом выступает фреймворк IPP-AL [4], от Informative Path Planning for Active Learning. Данный метод использует подход активного обучения и свёрточных нейронных сетей. Активное обучение — это раздел машинного обучения, в котором алгоритм обучения может в интерактивном режиме опрашивать человека, чтобы тот разметил новые данные. В данной работе целью стоит сбор наиболее информативных изображений.

Предлагается следующий подход. Имеется предварительно обученная нейросеть для семантической сегментации, которая развёрнута на квадрокоптере. Во время миссии нейросеть использует получаемые квадрокоптером RGB изображения для предсказания семантических меток в пикселях, а также получения значений неуверенности модели в предсказании и показателей новизны, предлагаемых авторами. Далее это величины проецируются на ландшафт местности в виде трёх карт, которые позволяют отображать эти переменные в интерпретируемой форме.

Данный фреймворк не привязан к конкретному способу планирования траектории и функции потерь, но авторы предлагают использовать в качестве функции потерь бюджет миссии, то есть количество метров, которые может преодолеть квадрокоптер за одну миссию, а в качестве стратегий планирования пути либо показатели неуверенности, либо показатели новизны. Использование взаимной информации Шеннона в данной работе предлагается следующее. Неуверенность модели в своих предсказания высока, если предсказанная апостериорная энтропия высока, в то время как энтропия единичных предсказаний низкая, но при этом эти энтропии не согласуются друг с другом. Основываясь на текущем бюджете миссии, на позиции квадрокоптера и на состоянии карты, планируется путь для сбора информативных данных обучения для дообучения сети и улучшения её работы. После окончания миссии собранные изображения либо размечаются вручную, либо с помощью другой нейросети для переподготовки нейросети, располагающейся на борту квадрокоптера. В своём подходе авторы предлагают использовать достаточно легковесную ERFNet с модификацией, позволяющей получать неуверенности модели, то есть Байесовскую ERFNet. Данная сеть представляет собой энкодер и декодер.

Альтернативой для метрики неуверенности в себе выступает метрика новизны изображения. Она рассчитывается по следующим шагам. Берётся представление изображение на выходе из энкодера. Затем проводится расчёт косинусных расстояний по каналам среди к ближайших соседей, проводится усреднение. В итоге получается значение новизны изображения, по которому можно сделать вывод о том, насколько данное изображение при текущем наборе известных данных является информативным. Ниже на рисунке 2 приведена общая схема предлагаемого подхода.

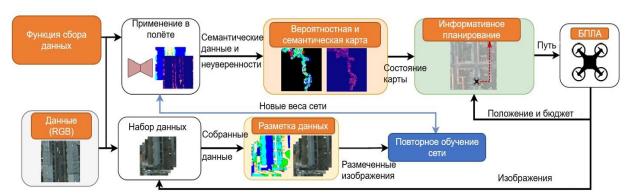


Рис. 2. Предлагаемый подход с использованием активного обучения

Последним рассматриваемым методом является фреймворк TARE [5], который использует иерархический подход к исследованию неизвестного окружения. Мотивацией данного подхода служит то, что только в близком к роботу окружению имеет смысл проводить детальные исследования окружения, потому мир можно поделить на локальный и глобальный горизонты. В локальном горизонте проводится много вычислений и детальное изучение окружения, в глобальном строится маршрут между зонами интереса.

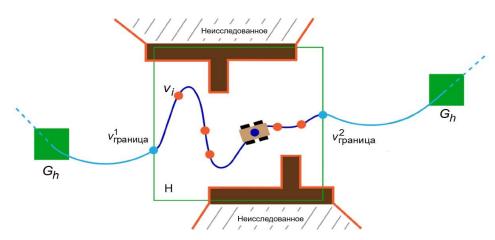


Рис. 3. Предлагаемый иерархический подход к разделению мира

На рисунке 3 показано представления мира. Локальный горизонт планирования обозначается через Н. Закрашенные зелёным кубы G_h представляю собой пространства, которые либо были исследованы, либо будут исследованы в дальнейшем. Голубые точки представляют собой границы локального горизонта, в которых соединяются локальная и глобальная траектории. Оранжевые точки представляют собой точки обзора, из которых можно провести исследование. Для генерации этих точек в пределах локального горизонта используется равномерное распределение. Оранжевые линии представляют собой неисследованное пространство, которое может быть изучено из точек обзора.

Предлагается использовать следующий алгоритм:

- 1. Выбор точек обзора:
 - а. в локальной области проводится выбор точек обзора;
 - b. проводится расчёт награды, то есть площади покрытия, которая может быть изучена из каждой точки обзора, для каждой точки;
 - с. на основе величины награды выбирается N точек, у которых награда наибольшая.
- 2. Построение траектории в локальной области:
 - а. в локальной области необходимо решить задачу коммивояжера, то есть построить такую траекторию, при движении по которой робот посетит все точки обзора только 1 раз;

- b. провести сглаживание траектории, чтобы избавиться от участков, в которых скорость резко меняет своё значение и направление;
- с. для построения сглаженной оптимальной локальной траектории используется функция потерь, учитывающая длину траектории, разбитую на сегменты, и количество остановок между этими сегментами.
- 3. Построение глобальной траектории:
 - а. на глобальном уровне необходимо соединить локальную траекторию с глобальной;
 - b. на этом уровне точками для посещения выбираются районы около объектов, которые могут являться препятствиями;
 - с. решается ещё одна задача коммивояжера, но уже на глобальном уровне, для получения дальнейшего маршрута следования.
- В итоге карту исследованного мира можно представить как набор небольших подпространств, G_h с рисунка 3, внутри которых всё пространство исследовано. После завершения исследования робот возвращается на начальную позицию.

В работе приведено исследование двух современных методов к изучению неизвестного окружения в автономном режиме: на основе понятия взаимной информации и на основе иерархии. Рассмотренные методы показывают качестве исследования выше, а скорость работы больше в сравнении с более классическими метода. Также стоит отметить, что данные методы не привязаны к конкретной мобильной робототехнической системе и могут быть использованы в разных сценариях миссий.

Список использованных источников

- Zhou B., Zhang Y., Chen X., Shen S. FUEL: Fast UAV Exploration Using Incremental Frontier Structure and Hierarchical Planning // IEEE Robotics and Automation Letters. –2021. – V. 6. – №. 2. – Pp. 779–786.
- 2. Dharmadhikari M., Dang T., Solanka L., Loje J., Nguyen H., Khedekar N., Alexis K. Motion Primitives-based Path Planning for Fast and Agile Exploration using Aerial Robots // 2020 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), France. 2020. Pp. 179–185.
- 3. Asgharivaskasi A., Atanasov N. Semantic OcTree Mapping and Shannon Mutual Information Computation for Robot Exploration // IEEE Transactions on Robotics. 2023. Pp. 1–19.
- Rückin J., Magistri F., Stachniss C., Popović M. An Informative Path Planning Framework for Active Learning in UAV-Based Semantic Mapping // IEEE Transactions on Robotics. – 2023. – V. 9. – №. 6. – Pp. 4279–4296.
- 5. Cao C., Zhu H., Choset H., Zhang J. TARE: A Hierarchical Framework for Efficiently Exploring Complex 3D Environments // Robotics: Science and Systems XVII. 2021.

Альманах нау	чных работ молоді	ых ученых Униве	рситета ИТМО	. Том 1. Систем	ны управления и э.	пектроинженерия
	Системы	VIINAR TA	чи риц	TEKTNO	инжене	DUC
	MCICIONIDI	ympabat		oneki pe	minkene	

УДК 531.5

ПЕРЕХОД ОТ ОЦЕНИВАНИЯ УКЛОНЕНИЯ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ НА ТРАЕКТОРИИ К ОЦЕНИВАНИЮ УКЛОНЕНИЯ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ НА ПЛОЩАДИ ИНЕРЦИАЛЬНО-ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Бездетко А.В.^{1,2} (студент), Тимочкин С.А.² Научный руководитель – д.т.н. Литманович Ю.А.²

1 – Университет ИТМО

2 – AO «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

e-mail: anastasiya_bezdetko_v@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

Рассматриваются и сравниваются два метода интерполяции при решении задачи определения уклонения отвесной линии инерциально-геодезическим методом на подвижном основании.

Ключевые слова

Инерциально-геодезический метод, уклонение отвесной линии, аномалии силы тяжести, инерциальная навигационная система, интерполяция.

Уклонением отвесной линии (УОЛ) называют угол между направлением вектора нормальной силы тяжести (нормалью к референц-эллипсоиду) и направлением вектора действительной силы тяжести (отвесной линией, нормалью к геоиду). Эти две нормали не совпадают в связи со сложностью внутренней структуры и рельефа Земли. Знание величины УОЛ необходимо для высокоточных инерциальных навигационных систем (ИНС), решения геологических задач.

Существуют несколько методов определения УОЛ, одним из которых является инерциально-геодезический, основанный на измерении и вычислении разности инерциальных и геодезических координат в точке наблюдения [1].

Как правило, для нахождения абсолютных значений УОЛ необходимо создавать реперные точки точных значений [2, 3]. В публикациях [4, 5] УОЛ оцениваются вдоль профиля движения носителя как квазинепрерывная последовательность значений. Для восстановления параметров УОЛ в заданной области при конечном множестве точек (профилей) необходима интерполяция.

В работе рассматривается постановка задачи оценивания УОЛ инерциально-геодезическим методом с формированием измерений как разности текущих инерциальных и геодезических координат [1, 6]. В двух вариантах — вдоль прямого профиля и на площади. В обоих вариантах значения УОЛ в реперных точках включаются в вектор состояния. Также в вектор состояния входят параметры модели систематической погрешности ИНС на неуправляемых гироскопах [7]:

$$\Delta \varphi = -\Delta h_{13} \cos \lambda_* - \Delta h_{11} \sin \lambda_* + \Delta \alpha_{11} \cos K - \Delta \alpha_{12} \sin K$$

$$\Delta \lambda \cos \varphi = -\Delta h_{13} \sin \varphi \sin \lambda_* + \Delta h_{11} \sin \varphi \cos \lambda_* + \Delta h_{21} \cos \varphi -$$

$$-(\Delta \alpha_{11} \sin^2 \varphi + \Delta \alpha_{21} \cos^2 \varphi) \sin K + (\Delta \alpha_{12} \sin^2 \varphi + \Delta \alpha_{22} \cos^2 \varphi) \cos K$$

$$\Delta \psi = \Delta h_{13} + \Delta h_{22} + (\Delta \alpha_{11} - \Delta \alpha_{21}) (\sin \varphi \sin K \sin \lambda_* - \cos K \cos \lambda_*) +$$

$$+(\Delta \alpha_{12} - \Delta \alpha_{22}) (\sin K \cos \lambda_* - \sin \varphi \cos K \sin \lambda_*)$$
(1)

где $\Delta \varphi$, $\Delta \lambda \cos \varphi$ — погрешности выработки широты и отшествия, $\Delta \psi$ — автономное измерение ИНС, $\Delta \alpha_{11}$, $\Delta \alpha_{12}$, $\Delta \alpha_{21}$, $\Delta \alpha_{22}$ — погрешности учета геометрических параметров, K — курсовой угол, $\lambda *$ — часовой угол, Δh_{11} , Δh_{13} , Δh_{21} , Δh_{22} — погрешности учета ортов кинетических моментов гироскопов в инерциальной системе координат.

В первом варианте для описания УОЛ как случайной постоянной функции координат используется модель, основанная на следующих положениях:

- оцениваемые значения УОЛ задаются в фиксированных точках, дискретно расположенных вдоль прямой на поверхности Земли;
- интервал между точками в несколько раз меньше ожидаемых пространственных неоднородностей истинных значений УОЛ, определяемых характеристическим расстоянием;
- корреляция между значениями УОЛ в точках отсутствует, либо задается в соответствии с одной из общепринятых моделей (например модели Джордана 3 порядка) [8];
- значения УОЛ между точками определяются путем интерполяции. Приведенные положения проиллюстрированы на рисунке 1.

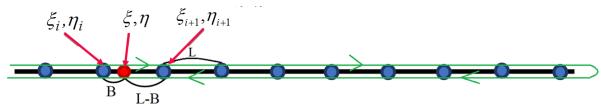


Рис. 1. Способ задания УОЛ

Таким образом, оцениваемый вектор состояния можно представить следующим выражением:

$$X = [\xi_1, \xi_2, ..., \xi_n, \eta_1, \eta_2, ..., \eta_n, X_{UHC}]^T,$$
(2)

где $X_{\mathit{UHC}} = [\Delta h_{11}, \Delta h_{13}, \Delta h_{21}, \Delta h_{22}, \Delta \alpha_{11}, \Delta \alpha_{12}, \Delta \alpha_{21}, \Delta \alpha_{22}]$ — вектор параметров модели (1), а вектор измерений:

$$Z = \begin{bmatrix} z_0 \\ z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{UHC} - \varphi_{CHC} \\ (\lambda_{UHC} - \lambda_{CHC}) \cos \varphi \\ \Delta \psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta \varphi_{UHC} + \xi \\ \Delta \lambda_{UHC} \cos \varphi + \eta \\ \Delta \psi \end{bmatrix}. \tag{3}$$

Основным назначением интерполяции здесь является не восстановление значений УОЛ в точке с произвольной координатой, а расчет весовых коэффициентов влияния значений УОЛ $\xi_{1...n}$, $\eta_{1...n}$ в дискретных точках на измерения z_0 и z_1 при нахождении ИНС в точке с произвольной координатой.

Если функция интерполяции в общем случае задана выражением:

$$\xi = f_{\xi}(\xi_{1..n}, S), \ \eta = f_{\eta}(\eta_{1..n}, S),$$
 (4)

где S — перемещение вдоль профиля съемки, тогда весовые коэффициенты (они же элементы матрицы наблюдения с учетом выражения (3)) предлагается рассчитывать как частные производные выражения (4) по соответствующим переменным состояния в текущей точке определяемой координатой S:

$$H_{Z_0}^{\xi_i} = \frac{\partial \xi}{\partial \xi_i} = \frac{\partial f_{\xi}(\xi_{1..n}, S)}{\partial \xi_i}, \ H_{Z_1}^{\eta_i} = \frac{\partial \eta}{\partial \eta_i} = \frac{\partial f_{\eta}(\eta_{1..n}, S)}{\partial \eta_i}, \tag{5}$$

где i – номер реперной точки и соответствующей переменной состояния.

Простейшим представляется использование линейной интерполяции, в данном случае учитываются только две реперные точки, соседние с текущим местоположением. Таким образом, при линейной интерполяции, с учетом обозначений на рисунке 1 функции (4) могут, быть записаны следующим образом:

$$\xi = \left(1 - \frac{B}{L}\right) \cdot \xi_{i} + \frac{B}{L} \xi_{i+1}, \ \eta = \left(1 - \frac{B}{L}\right) \cdot \eta_{i} + \frac{B}{L} \eta_{i+1},$$

$$H_{Z_{0}}^{\xi_{i}} = 1 - \frac{B}{L}, \ H_{Z_{0}}^{\xi_{i+1}} = \frac{B}{L}, \ H_{Z_{1}}^{\eta_{i}} = 1 - \frac{B}{L}, \ H_{Z_{1}}^{\eta_{i+1}} = \frac{B}{L}.$$
(6)

Для интерполяции может быть использована и более сложная функция, где критерием применимости представляется соответствие статистическим характеристикам УОЛ и дифференцируемость в соответствии с выражением (5). Подбор конкретной функции является целью дальнейших исследований.

Как правило, исследуемый район представляет собой не один профиль, а некоторую площадь, поэтому во втором способе предлагается одновременно оценивать параметры характеризующие УОЛ на площади при движении несколькими смежными галсами, при этом автоматически учитывается взаимная корреляция как значений УОЛ [8, с. 232], так и погрешностей ИНС между смежными галсами. Здесь так же, как в первом варианте, значения УОЛ описываются конечным числом параметров, которые соответствуют реперным точкам, расположенным в узлах равномерной сетки. Использование в качестве параметров непосредственно значений УОЛ нецелесообразно, так как при этом не учитывается связь ортогональных составляющих УОЛ как градиентов одной и той же поверхности геоида высотой N вдоль горизонтальных осей местной прямоугольной системы координат [9].

$$\xi = -\frac{\partial N}{\partial u}, \ \eta = -\frac{\partial N}{\partial v}, \tag{7}$$

где ось u направлена к северу, а ось v к востоку.

Таким образом при постановке задачи оценивания УОЛ на площади сохраняется способ формирования измерений (4), но в векторе состояния оказываются высоты геоида в реперных точках сетки размером n×m и параметры погрешности ИНС:

$$X = [N_{11}, ..., N_{1m}, N_{21}, ..., N_{nm}, X_{UHC}]^{T}.$$
 (8)

Формирование матрицы измерений также требует нахождения частных производных значений УОЛ в текущей точке по каждому из оцениваемых значений высоты геоида $N_{1,1},...,N_{1,m},N_{2,1},...,N_{n,m}$, что также требует интерполирующей функции, которую в общем случае можно записать в виде:

$$N = f_N(N_{1,1},...,N_{1,m},N_{2,1},...,N_{n,m},S_u,S_v),$$
(9)

где S_u , S_v – локальные координаты в области съемки.

Составляющие УОЛ вычисляются как градиенты интерполирующей функции (9):

$$\xi = f_{\xi}(N_{1,1},...,N_{1,m},N_{2,1},...,N_{n,m},S_{u},S_{v}) = \nabla_{u}f_{N}$$

$$\eta = f_{\eta}(N_{1,1},...,N_{1,m},N_{2,1},...,N_{n,m},S_{u},S_{v}) = \nabla_{v}f_{N}.$$
(10)

Тогда элементы матрицы измерений принимают вид:

$$H_{Z_0}^{\xi_i} = \frac{\partial \xi}{\partial N_i} = \frac{\partial f_{\xi}}{\partial N_i}, H_{Z_1}^{\eta_i} = \frac{\partial \eta}{\partial N_i} = \frac{\partial f_{\eta}}{\partial N_i}, \tag{11}$$

где i — номер в векторе состояния каждого из параметров $N_{1,1},..,N_{1,m},N_{2,1},..,N_{n,m}$.

Выбор конкретного вида интерполирующей функции (9) так же, как и в первом варианте является предметом дальнейших исследований и определяется соответствием статистическим характеристикам оцениваемых параметров (детализацией), шагом сетки реперных точек, требованием гладкости и дифференцируемости в соответствие с выражениями (10), (11).

Например, в работе [10] применяются разложение поля аномального потенциала силы тяжести скейлинг-функциями Абеля-Пуассона.

При оценивании УОЛ в виде модели из дискретных значений в реперных точках требуется интерполяция для двух целей: формирование матрицы измерений между реперными точками, восстановления непрерывных значений УОЛ по оцененным параметрам.

При оценивании УОЛ на площади в качестве оцениваемых параметров целесообразно использовать скалярные значения высоты геоида, что позволяет учесть корреляцию между значениями УОЛ на смежных галсах.

Список использованных источников

- 1. Пешехонов В.Г. Проблема уклонения отвесной линии в высокоточной инерциальной навигации. Гироскопия и навигация. 2020. Т. 28. №. 4(111). С. 3–15. DOI 10.17285/0869-7035.0046.
- 2. Емельянцев Г.И., Блажнов Б.А., Степанов А.П. О возможности определения УОЛ в высоких широтах с использованием прецизионного инерциального модуля и двухантенной спутниковой аппаратуры. Гироскопия и навигация. − 2015. − №. 3(90). − С. 72–81. DOI 10.17285/0869-7035.2015.23.3.072-081.
- 3. Дмитриев С.П. Инерциальные методы в инженерной геодезии. 1997. 208 с.
- 4. Kwon JH, Jekeli C. A new approach for airborne vector gravimetry using GPS/INS // Journal of Geodesy. − 2001. − №. 74. − Pp. 690–700.
- 5. Dai D., Wang X., Zhan D., Qin S., Huang Z. Dynamic Measurement of High-frequency Deflections of the Vertical Based on the Observation of INS/GNSS Integration Attitude Error // Journal of Applied Geophysics. 2015. Vol. 119. Pp. 89–98. DOI: 10.1016/j.jappgeo.2015.05.010.
- 6. Пешехонов В.Г., Степанов О.А., Августов Л.И., Блажнов Б.А., Болотин Ю.В., Вершовский А.К., Витушкин Л.Ф., Вязьмин В.С., Гайворонский С.В., Голован А.А., Евстифеев М.И., Емельянцев Г.И., Железняк Л.К., Конешов В.Н., Носов А.С. и др. Современные методы и средства измерения параметров гравитационного поля Земли. 2017. 390 с.
- 7. Гусинский В.З., Лесючевский В.М., Литманович Ю.А. Выставка и калибровка инерциальной навигационной системы с многомерной моделью погрешностей инерциальных измерителей / IV Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам. СПб.: ЦНИИ "Электроприбор". 1997. С. 27–40.
- 8. Анучин О.Н., Емельянцев Г.И. Интегрированные системы ориентации и навигации для морских подвижных объектов. 2003. 390 с.
- 9. Мориц Γ . Современная физическая геодезия. Перевод с английского Π . Π . Менделеева под редакцией Ю.М. Неймана, Недра. 1983. 392 с.
- 10. Болотин Ю.В., Вязьмин В.С. Методы 12 и минимаксного оценивания в задаче определения аномалии силы тяжести по данным аэрогравиметрии с использованием сферического вейвлет-разложения // Гироскопия и навигация. − 2015. № 3. С. 82–94.

УДК 543.429.2

АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФАЗОВОЙ ЗАДЕРЖКИ ВО ВХОДНОМ СИГНАЛЕ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ЯЧЕЕК

Власова М.А.^{1, 2} (магистрант), Шевченко А.Н.² Научный руководитель – к.т.н. Безмен Г.В.²

1 – Университет ИТМО

2 – AO «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

e-mail: mary vlasova446@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В работе рассмотрены причины возникновения фазовой задержки во входном сигнале синхронного детектора установки для контроля параметров газовых ячеек. Методом максимизации амплитуды получены значения фазовых задержек для экспериментальных резонансных линий, получаемых с помощью установки. Исследована зависимость фазовой задержки от значения индукции магнитного поля, в котором проводятся измерения, в одном пуске и при перезапуске установки.

Ключевые слова

Фазовая задержка, контроль параметров, газовая ячейка, квантовый датчик, синхронный детектор.

Газовая ячейка является центральным компонентом квантовых датчиков, работающих на эффекте магнитного резонанса. К таким устройствам относятся квантовые магнитометры, гироскопы, стандарты частоты. Их принцип работы основан на взаимодействии света и рабочего вещества, заключённого в объёме газовой ячейки [1, 2], которая должна удовлетворять требованиям по качеству изготовления и заполнения рабочим веществом (смеси щелочного металла, инертного газа и буферного газа). Существует несколько способов определения характеристик газовых ячеек. Так, отсутствие герметичности из-за микротрещин в ячейке можно выявить по цвету щелочного металла, оценить количество примесей в ячейке, а также давление буферного газа в её объёме можно на основе анализа линии оптического поглощения.

Одним из способов определения характеристик газовых ячеек является анализ линии магнитного резонанса. По ширине этой линии можно определить время жизни щелочного металла в ячейке и предельную чувствительность магнитометрической схемы разрабатываемого датчика. Ширина магнитного резонанса определяется путём анализа по одной из составляющих выходного сигнала синхронного детектора — синфазной и квадратурной. В идеальном случае форма синфазной составляющей на выходе синхронного детектора представляет собой дисперсионный контур, однако из-за наличия фазовой задержки на входе синхронного детектора происходит его «смешение» с Лоренцовским контуром поглощения. Возникает необходимость разделения этих составляющих путем подбора фазы, на которую сдвинут исходный сигнал.

Целью работы является анализ причин возникновения фазовой задержки во входном сигнале синхронного детектора установки для контроля параметров газовых ячеек.

Установка для контроля параметров газовых ячеек. Схема установки для контроля параметров газовых ячеек представлена на рисунке 1. В ячейке с помощью катушек генерируется переменное магнитное поле радиочастотного диапазона B_{rf} . При этом угол поворота поляризации излучения детектирования l_{probe} оказывается модулирован с частотой приложенного радиополя и фазой, зависящей от расстройки частоты радиополя ω_{rf} относительно резонансной частоты ω_{r} . При этом ω_{r} определяется как [3]:

$$\omega_r = B_0 \cdot \gamma, \tag{1}$$

где B_0 — индукция магнитного поля, в котором производятся измерения, γ — гиромагнитное отношение, для используемого в экспериментальной ячейке цезия $\gamma = 3.5 \, \Gamma \text{ц/T}$ л.

Поворот поляризации детектируется балансным фотодиодом и является входным сигналом синхронных детекторов 1 и 2. Опорным сигналом синхронного детектора 1 является сигнал генератора, создающий магнитное поле в катушках, а опорным сигналом синхронного детектора 2 — этот же сигнал, повёрнутый по фазе на 90 градусов. На выходе синхронных детекторов 1 и 2 создаются два сигнала — квадратурный S_x и синфазный S_y , соответственно.

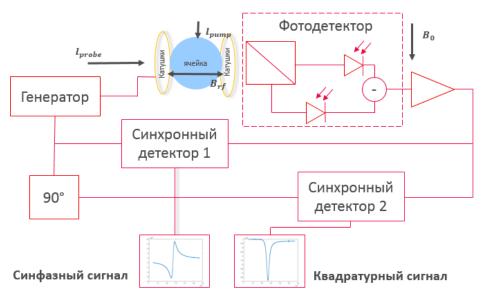


Рис. 1. Схема установки для контроля параметров газовых ячеек

Фазовая задержка. При изменении частоты радиополя ω_r , возникает фазовая задержка, зависящая от двух параметров — временной задержки в сигнальном тракте и геометрии установки, определяемой взаимным расположением лазера накачки и катушек радиополя.

Фазовая задержка φ может быть представлена в виде [3]:

$$\varphi(\omega) = \varphi_0 + \omega_{rf} \cdot T_d, \tag{2}$$

где φ_0 — постоянная составляющая фазовой задержки, вызванная геометрией установки, T_d — эффективная временная задержка сигнальном тракте.

Причем при значении фазовой задержки $\varphi = 0$ квадратурный S_x и синфазный S_y сигналы принимают форму контура поглощения и дисперсионного контура, соответственно.

Компенсация фазовой задержки. Для изучения причин возникновения фазовой задержки была получена серия резонансных кривых, записанных в разное время. На рисунке 2 представлены синфазные сигналы синхронного детектора для 4 измерений. Все кривые получены на одной частоте резонанса.

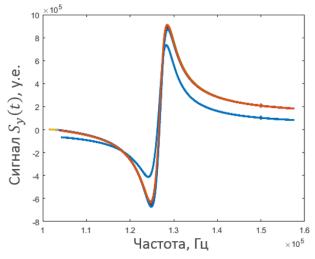
Резонансные кривые на рисунке 2 имеют разные формы, а значит, в дисперсионном контуре присутствует «примесь» контура поглощения, что указывает на фазовую задержку во входном сигнале синхронного детектора. Её необходимо определить и компенсировать, чтобы контур принял дисперсионную форму, что необходимо для корректного определения ширины резонанса.

Получить контур поглощения S_1 и дисперсионный контур S_2 можно, повернув сигналы с синхронных деьекторов на фазу φ_{ont} [4]:

$$S_1 = cos(\varphi_{opt}) \cdot S_x - sin(\varphi_{opt}) \cdot S_y, \tag{3}$$

$$S_2 = cos(\varphi_{opt}) \cdot S_y + sin(\varphi_{opt}) \cdot S_x, \tag{4}$$

где S_x — исходный квадратурный сигнал, S_y — исходный синфазный сигнал. При этом значение подобранной фазы φ_{opt} равно по модулю и противоположно по знаку сдвигу фазы φ : $\varphi_{opt} = -\varphi$.



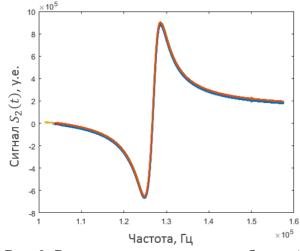


Рис. 2. Резонансные кривые

Рис. 3. Резонансные кривые с подобранной фазой

Существует несколько способов подбора фазы φ_{opt} [5]. В работе использован способ максимизации амплитуды синфазного сигнала. Он осуществлялся путём перебора фаз и выбора той фазы, при которой амплитуда дисперсного сигнала S_2 является максимальной. На рисунке 3 представлен результат подбора фазы φ_{opt} , для серии приведённых выше экспериментальных резонансных кривых. Все они приняли единый вид (форму дисперсионного контура), что говорит о корректности подбора фазы.

Зависимость фазовой задержки от индукции постоянного магнитного поля. В работе исследована зависимость фазовой задержки φ_{opt} от индукции магнитного поля B_0 , в котором проводится эксперимент, для двух случаев: при проведении всех измерений в одном пуске и при перезапуске установки на каждом измерении. В ходе проведения каждого эксперимента были получены резонансные кривые при различных значениях B_0 . Для каждой кривой методом максимизации амплитуды было получено значение фазовой задержки φ_{opt} , которое «превращает» исходный сигнал в сигнал с формой дисперсионного контура, т.е. выполняется условие равенства подобранной фазовой задержки реальному сдвигу фазы с противоположным знаком: $\varphi_{opt} = -\varphi$.

С учетом (1) и (2) значение подобранной фазы φ_{opt} может быть представлено в виде:

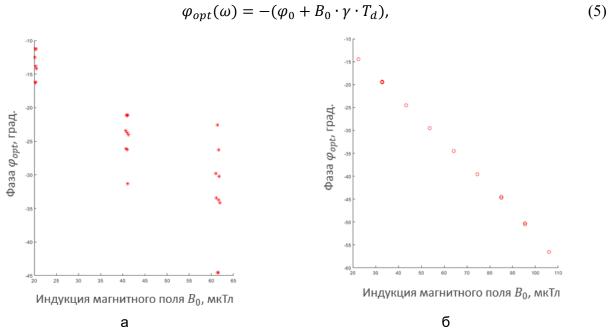


Рис. 4. Зависимость подобранных значений фаз от индукции постоянного магнитного поля

Зависимости подобранных значений фаз φ_{opt} от индукции постоянного магнитного поля B_0 представлены на рисунке 4 а и б для эксперимента при перезапуске установки на каждом измерении и при снятии показаний в одном пуске, соответственно.

С увеличением индукции магнитного поля B_0 среднее значение модуля подобранной фазовой задержки φ_{opt} увеличивается. При этом в эксперименте, в рамках которого производился перезапуск установки, с увеличением индукции магнитного поля увеличивается разброс подобранных значений φ_{opt} — чем больше значение B_0 , тем больше разброс φ_{opt} . В эксперименте, проведённом в одном пуске, такого разброса не наблюдается — все подобранные фазы имеют линейную зависимость и определяются однозначно.

Наличие разброса подтверждает то, что подобранное значение фазовой задержки φ_{opt} зависит от эффективной временной задержки сигнала в сигнальном тракте T_d .

Таким образом, в работе экспериментально подтверждено, что фазовый сдвиг на входе синхронного детектора обусловлен двумя типами физических факторов: геометрия датчика и временная задержка в сигнальном тракте. Показано, что в пуске значение постоянной составляющей фазовой задержки, вызванной геометрией, и значение эффективной временной задержки сигнала в сигнальном тракте установки стабильны. Величина подобранной фазовой задержки определяется только значением индукции магнитного поля, при котором проводятся измерения. Выявлено, что при каждом запуске стенда значение эффективной временной задержки сигнала в сигнальном тракте установки принимает случайную величину, что приводит к увеличению разброса подобранной фазы с увеличением индукции постоянного магнитного поля

Список использованных источников

- 1. Пешехонов В.Г. Перспективы гироскопии // XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019. 2019. С. 36–38.
- 2. Вершовский А.К. и др. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. − 2018. − Т. 26. − №. 1. − С. 100.
- 3. Вершовский А.К., Пазгалев А.С. Квантовые М [x]-магнитометры с оптической накачкой: цифровые способы измерения частоты М [x]-резонанса в быстро меняющемся поле // Журнал технической физики. − 2006. − Т. 76. № 7. − С. 108–112.
- 4. Вершовский А.К., Дмитриев С.П., Пазгалев А.С. Квантовый магнитометр с оптической накачкой, комбинирующий достоинства МХ-и МZ-устройств // Журнал технической физики. -2013. Т. 83. №. 10. С. 90–97.
- 5. Groeger S. et al. A high-sensitivity laser-pumped M x magnetometer // The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics. 2006. T. 38. C. 239–247.

УДК 681.5

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ

Живицкий А.Ю. 1 (аспирант), Захаров Д.Н. 1 (аспирант), Куровский А.М. 1 (студент), Куровский Д.М. 1 (студент)

Научный руководитель – старший научный сотрудник Борисов О.И.1

1 – Университет ИТМО

e-mail: zhivitckii@itmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В работе рассматривается процедура синтеза робастного регулятора по выходу для п-звенного манипуляционного робота, приводимого в движение с помощью синхронных двигателей с постоянными магнитами. Приводится найденная замена координат, которая позволяет привести исходную нелинейную модель в нормальную форму для последующей линеаризации с помощью обратной связи. Данная замена переменных исключает наличие нестационарных коэффициентов в цепочке интеграторов модели. Рассматривается синтез робастного закона управления на основе расширенного наблюдателя.

Ключевые слова

Манипуляционный робот, управление по выходу, робастное управление, геометрический подход, расширенный наблюдатель.

Разработчикам систем управления зачастую приходится сталкиваться с нелинейными, имеющими сложную структуру, объектами, характеризующимися параметрическими неопределенностями, вызванными недостатком априорной информации или изменением параметров в ходе эксплуатации, такими как износ и деформация компонентов. Для решения этой проблемы применяют робастные методы управления. Одним из мощных инструментов является метод на основе расширенного наблюдателя [1]. Для манипуляционного робота преобразование в нормальную форму и последующее применение расширенного наблюдателя описано в [2]. Однако, преобразованная модель включает нестационарные коэффициенты усиления, что обуславливает модификацию исходного алгоритма и накладывает допущение о знании матрицы инерции. Предлагаемая в работе замена переменных позволяет избавиться от нестационарного коэффициента и от необходимого знания матрицы инерции, используя лишь ее статическую оценку, которая, может быть получена шагом ранее при помощи одного из описанных авторами в [3] алгоритмов параметрической идентификации, и далее применить обычный расширенный наблюдатель без модификации.

Рассмотрим динамическую модель п-звенного манипуляционного робота:

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau, \tag{1}$$

где $\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta} \in \mathbb{R}^n$ — вектора обобщенных координат, скоростей и ускорений, соответственно, $M(\theta) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица инерции, $h(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^n$ — вектор, в котором сосредоточены остальные динамические компоненты, вида

$$h(\theta, \dot{\theta}) = C(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + F\dot{\theta} + g(\theta),$$

где $C(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица кориолисовых и центробежных сил, $F \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица вязкого трения, $g(\theta) \in \mathbb{R}^n$ — вектор гравитационных сил, $\tau \in \mathbb{R}^n$ — вектор моментов сил, развиваемых синхронными двигателями с постоянными магнитами, описываемые уравнением

$$\tau = \Psi I^{\mathsf{T}} J \mathcal{C}(\theta) \nu, \tag{2}$$

где $\Psi = diag(\psi_1, \psi_2, ..., \psi_n) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица с элементами вида $\psi_k = \lambda_{mk} n_{pk} r_k$, которые при $k = \overline{1,n}$ представляют собой произведения постоянных магнитного потока $\lambda_{mk} \in \mathbb{R}$, количества пар полюсов $n_{pk} \in \mathbb{R}$ и передаточных чисел $r_k \in \mathbb{R}$, $I = diag(i_1, i_2, ..., i_n) \in \mathbb{R}^{2n \times n}$ — матрица токов $i_k = (i_{\alpha k} i_{\beta k})^\mathsf{T}$, $J = diag(J_0, J_0, ..., J_0) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ — матрица с элементами вида $J_0 = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$, $\mathcal{C}(\theta) = diag(\mathcal{C}_0(\theta_1), \mathcal{C}_0(\theta_2), ..., \mathcal{C}_0(\theta_n)) \in \mathbb{R}^{2n \times n}$ — матрица с элементами вида $\mathcal{C}_0(\theta_k) = \begin{pmatrix} \cos{(n_{pk} r_k \theta_k)} \\ \sin{(n_{pk} r_k \theta_k)} \end{pmatrix}$ и $\nu = (1 \ 1 \ ... \ 1) \in \mathbb{R}^n$.

Динамика токов синхронных двигателей с постоянными магнитами описывается дифференциальным уравнением

$$\frac{dI}{dt}L = -IR - J\mathcal{C}(\theta)\Psi\Omega(\dot{\theta}) + V_{\alpha\beta},\tag{3}$$

где $L = diag(L_1, L_2, ..., L_k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица индуктивности статора, $R = diag(R_1, R_2, ..., R_k) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица сопротивлений обмоток статора, $\Omega(\dot{\theta}) = diag(\dot{\theta}_1, \dot{\theta}_2, ..., \dot{\theta}_n) \in \mathbb{R}^{n \times n}$ — матрица угловых скоростей, $V_{\alpha\beta} = diag(v_{\alpha\beta1}, v_{\alpha\beta2}, ..., v_{\alpha\beta n}) \in \mathbb{R}^{2n \times n}$ — матрица напряжений $v_{\alpha\beta k} = (v_{\alpha k} \quad v_{\beta k})^{\mathsf{T}}$.

Необходимо преобразовать модель робота (1) в нормальную форму для последующей разработки алгоритма робастного управления по выходу в режиме слежения за заданной траекторией с обеспечением условия

$$\lim_{t \to \infty} \|\theta_e(t)\| \le \varepsilon,\tag{4}$$

где $\varepsilon > 0$ – сколь угодно малое число.

Выполним следующую глобально определенную замену переменных

$$\begin{split} \xi_1 &= \theta - \theta_{ref}, \\ \xi_2 &= \dot{\theta} - \dot{\theta}_{ref}, \\ \xi_3 &= M^{-1}(\theta) \big[\Psi I^{\mathsf{T}} J \mathcal{C}(\theta) \nu - h \big(\theta, \dot{\theta} \big) \big] - \ddot{\theta}_{ref}, \\ z &= M^{-1}(\theta) \Psi I^{\mathsf{T}} \mathcal{C}(\theta) \nu. \end{split}$$

Продифференцировав новые переменные, получим систему в нормальной форме

$$\begin{split} \dot{\xi}_1 &= \xi_2, \\ \dot{\xi}_2 &= \xi_3, \\ \dot{\xi}_3 &= \frac{d}{dt} M^{-1}(\theta) \big[\Psi I^{\mathsf{T}} J \mathcal{C}(\theta) \nu - h(\theta, \dot{\theta}) \big] + M^{-1}(\theta) \left[\Psi \frac{d}{dt} I^{\mathsf{T}} J \mathcal{C}(\theta) \nu + \Psi I^{\mathsf{T}} J \frac{d}{dt} \mathcal{C}(\theta) \nu - \frac{d}{dt} h(\theta, \dot{\theta}) \right] - \theta_{ref}^{(3)}, \\ \dot{z} &= \frac{d M^{-1}(\theta)}{dt} \Psi I^{\mathsf{T}} \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi \frac{d I^{\mathsf{T}}}{dt} \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi I^{\mathsf{T}} \frac{d \mathcal{C}(\theta)}{dt} \nu. \end{split}$$

Рассмотрим вычисление производных новых переменных, в частности, нас интересует ξ_3 , с учетом следующих обозначений

$$\frac{d}{dt}M^{-1}(\theta) = \frac{\partial}{\partial\theta}[M^{-1}(\theta)]\dot{\theta} = \frac{\partial}{\partial(\xi_1 + \theta_{ref})}[M^{-1}(\xi_1 + \theta_{ref})](\xi_2 + \dot{\theta}_{ref}) =: \dot{M}(\xi, \Theta_{ref}),$$

$$\frac{d}{dt}h(\theta,\dot{\theta}) = \frac{\partial}{\partial\theta}[h(\theta,\dot{\theta})]\dot{\theta} + \frac{\partial}{\partial\dot{\theta}}[h(\theta,\dot{\theta})]\ddot{\theta},$$

$$\frac{d}{dt}h(\theta,\dot{\theta}) = \frac{\partial}{\partial(\xi_{1} + \theta_{ref})}[h(\xi_{1} + \theta_{ref},\xi_{2} + \dot{\theta}_{ref})](\xi_{2} + \dot{\theta}_{ref}) + \frac{\partial}{\partial(\xi_{2} + \dot{\theta}_{ref})}[h(\xi_{1} + \theta_{ref},\xi_{2} + \dot{\theta}_{ref})](\xi_{2} + \dot{\theta}_{ref}),$$

$$\frac{d}{dt}h(\theta,\dot{\theta}) =: \dot{h}(\xi,\Theta_{ref}),$$

получим

$$\begin{split} \dot{\xi}_{3} &= \dot{M} \left(\xi, \Theta_{ref} \right) \Psi I^{\top} J \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi \frac{d}{dt} I^{\top} J \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi I^{\top} J \frac{d}{dt} \mathcal{C}(\theta) \nu - \dot{M} \left(\xi, \Theta_{ref} \right) h \left(\theta, \dot{\theta} \right) - M^{-1}(\theta) \dot{h} \left(\xi, \Theta_{ref} \right) - \theta_{ref}^{(3)}, \end{split}$$

$$\begin{split} \dot{\xi}_3 &= \dot{M} \big(\xi, \Theta_{ref} \big) \Psi I^{\mathsf{T}} J \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi \mathsf{L}^{-1} \big[-IR - J \mathcal{C}(\theta) \Psi \Omega \big(\dot{\theta} \big) + V_{\alpha\beta} \big]^{\mathsf{T}} J \mathcal{C}(\theta) \nu - \\ &- M^{-1}(\theta) \bar{\Psi} \Omega \big(\dot{\theta} \big) \Psi I^{\mathsf{T}} \mathcal{C}(\theta) \nu - \dot{M} \big(\xi, \Theta_{ref} \big) h \big(\theta, \dot{\theta} \big) - M^{-1}(\theta) \dot{h} \big(\xi, \Theta_{ref} \big) - \theta_{ref}^{(3)}, \end{split}$$

$$\dot{\xi}_{3} = \left[\dot{M} \left(\xi, \Theta_{ref} \right) - L^{-1} R \right] \left[M \left(\xi_{1} + \theta_{ref} \right) \left[\xi_{3} + \ddot{\theta}_{ref} \right] + h \left(\xi_{1} + \theta_{ref} \right) \right] - M^{-1} \left(\xi_{1} + \theta_{ref} \right) \Psi L^{-1} \Omega \left(\xi_{2} + \dot{\theta}_{ref} \right) \Psi \nu - \overline{\Psi} \Omega \left(\xi_{2} + \dot{\theta}_{ref} \right) z - \dot{M} \left(\xi, \Theta_{ref} \right) h \left(\xi_{1} + \theta_{ref}, \xi_{2} + \dot{\theta}_{ref} \right) - M^{-1} \left(\xi_{1} + \theta_{ref} \right) \dot{h} \left(\xi, \Theta_{ref} \right) - \theta_{ref}^{(3)} + M^{-1} (\theta) L^{-1} \Psi \mathcal{C}(\theta) J^{\mathsf{T}} V_{\alpha\beta} \nu,$$

$$\dot{\xi}_3 =: q(z, \xi, \Theta_{ref}) + B\mathcal{C}(\theta) J^{\mathsf{T}} V_{\alpha\beta} \nu.$$

Дифференцируя z, получим выражение

$$\dot{z} = \frac{d}{dt} [M^{-1}(\theta)] \Psi I^{\mathsf{T}} \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi \frac{dI^{\mathsf{T}}}{dt} \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi I^{\mathsf{T}} \frac{d\mathcal{C}(\theta)}{dt} \nu,$$

$$\dot{z} = \dot{M} \left(\xi, \Theta_{ref} \right) \Psi I^{\mathsf{T}} \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi L^{-1} \left[-IR - J\mathcal{C}(\theta) \Psi \Omega \left(\dot{\theta} \right) + V_{\alpha\beta} \nu \right]^{\mathsf{T}} \mathcal{C}(\theta) \nu + M^{-1}(\theta) \Psi I^{\mathsf{T}} J\mathcal{C}(\theta) \overline{\Psi} \Omega \left(\dot{\theta} \right) \nu,$$

$$\dot{z} = -M^{-1}L^{-1}Rz + \dot{M}(\xi, \Theta_{ref})\Psi I^{\mathsf{T}}\mathcal{C}(\theta)\nu + +\overline{\Psi}\Omega(\xi_2 + \dot{\theta}_{ref})[M(\xi_1 + \theta_{ref})[\xi_3 + \ddot{\theta}_{ref}] + h(\xi_1 + \theta_{ref})] + M^{-1}(\theta)L^{-1}\Psi\mathcal{C}(\theta)V_{\alpha\beta}\nu,$$

$$\dot{z} =: f_0 \big(z, \xi, \Theta_{ref} \big) + BV_d.$$

Поскольку сигнал θ измерим, то, используя его, применим преобразование Парка

$$V_{\alpha\beta} = \mathcal{P}(\theta)V_{dq},$$

где $\mathcal{P}(\theta) = diag(\mathcal{P}_0(\theta_1), \mathcal{P}_0(\theta_2), ..., \mathcal{P}_0(\theta_n)) \in \mathbb{R}^{2n \times 2n}$ — матрица с элементами $\mathcal{P}_0(\theta_k) = (\mathcal{C}_0(\theta_k) \ J_0\mathcal{C}(\theta_k))$ и $V_{dq} = diag(v_{dq1}, v_{dq2}, ..., v_{dqn}) \in \mathbb{R}^{2n \times n}$ — матрица новых управляющих воздействий $v_{dqk} = (v_{dk} \ v_{qk})^\mathsf{T}$, заданных во вращающейся системе координат dq. Применяя преобразование Парка, получим

$$\dot{z} = f_0(z, \xi, \Theta_{ref}) + BV_d,
\dot{\xi}_1 = \xi_2,
\dot{\xi}_2 = \xi_3,
\dot{\xi}_3 = q(z, \xi, \Theta_{ref}) + BV_q,$$

где $V_d = (v_{d1} \quad v_{d2} \quad \dots \quad v_{dn})^{\mathsf{T}} \in \mathbb{R}^n$ и $V_q = (v_{q1} \quad v_{q2} \quad \dots \quad v_{qn})^{\mathsf{T}} \in \mathbb{R}^n$.

Выберем $V_d = 0$ и следующее линеаризующее управление

$$V_q^* = B^{-1} \left[-q(z, \xi, \Theta_{ref}) + K\xi \right],$$

и заменим его на реализуемый робастный закон вида

$$V_q = sat_l[B_0^{-1}(-\sigma + K\hat{\xi})],$$

где $sat_{\ell}(\cdot)$ — гладкая функция насыщения с границей ℓ , B_0 — обратимая матрица, удовлетворяющая следующему условию

$$\| [B - B_0] B_0^{-1} \|_1 \le \delta_0 < 1, \tag{5}$$

а переменные $\hat{\xi}$ и σ являются состояниями расширенного наблюдателя вида

$$\begin{split} \dot{\xi}_{1} &= \hat{\xi}_{2} + \kappa A_{3} (\xi_{1} - \hat{\xi}_{1}), \\ \dot{\hat{\xi}}_{2} &= \hat{\xi}_{2} + \kappa A_{2} (\xi_{1} - \hat{\xi}_{1}) \\ \dot{\hat{\xi}}_{3} &= \sigma + B_{0} V_{q} + \kappa^{3} A_{1} (\xi_{1} - \hat{\xi}_{1}), \\ \dot{\sigma} &= \kappa^{4} A_{0} (\xi_{1} - \hat{\xi}_{1}), \end{split}$$

где (A_0, A_1, A_2, A_3) — матрицы с настроечными параметрами и k > 0 — достаточно высокий коэффициент усиления, обеспечивает достижение цели управления.

Поскольку матричный коэффициент B_0 зависит от коэффициента B, который в свою очередь зависит от матрицы инерции $M(\theta)$, то очевидно, чем ближе значения B_0 к значениям B, тем менее вероятным является сценарий потери управляемости системы. Для обеспечения наибольше приближения B_0 возможно воспользоваться алгоритмами идентификации параметров манипуляционного робота, описанными авторами в работе [3], и получить оценку матрицы инерции.

В качестве верификации предложенного алгоритма управления рассмотрим результаты компьютерного моделирования с 2-звенным плоским манипуляционным роботом, динамика которого может быть описана уравнениями (1) с вращательными сочленениями, которые приводятся в движение синхронными двигателями с постоянными магнитами, описываемыми моделью (2) и (3). Параметры моделей (1)-(3) заданы следующим образом

$$M(\theta) = \begin{pmatrix} 4.5 + \cos \theta_2 & 1.25 + 0.5 \cos \theta_2 \\ 1.25 + 0.5 \cos \theta_2 & 1.8 \end{pmatrix}, \qquad L_i = 20, \qquad n_{pi} = 8,$$

$$C(\theta, \dot{\theta}) = \begin{pmatrix} -0.5 \dot{\theta}_2 \sin \theta_2 & -0.5 (\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2) \sin \theta_2 \\ 0.5 \dot{\theta}_1 \sin \theta_2 & 0 \end{pmatrix}, \qquad R_i = 7.2, \qquad \lambda_{mi} = 0.6,$$

$$F = \begin{pmatrix} 0.005 & 0 \\ 0 & 0.005 \end{pmatrix}, \qquad j_i = 0.55,$$

$$g(\theta) = \begin{pmatrix} 14.7 \cos \theta_2 + 4.9 \cos(\theta_1 + \theta_2) \\ 0.5 \cos(\theta_1 + \theta_2) \end{pmatrix}, \qquad F_i = 0.005.$$

Значения коэффициентов регулятора выбраны как

$$K = \begin{pmatrix} -100 & 0 & -100 & 0 & -100 & 0 \\ 0 & -100 & 0 & -100 & 0 & -100 \end{pmatrix},$$

$$\ell = 10^5, \quad \kappa = 10^3.$$

Результаты моделирования приведены на рисунках 1-3. В качестве желаемой траектории движения были использованы постоянный, гармонический и полиномиальный задающие сигналы. Можно заметить, что выходные переменные сходятся сколь угодно близко к задающим сигналам, а сигналы ошибок сходятся к сколь угодно малой области в окрестности нуля, что иллюстрирует достижение цели управления (4). В связи с достигаемым свойствами устойчивости системы, в случае зависящего от времени задающего сигнала ошибка слежения сходится в область в окрестности нуля. Размер области может быть уменьшен за счет увеличения коэффициентов расширенного наблюдателя. Также на графиках приведено значение δ_0 и проиллюстрировано выполнение условия (5), гарантирующего сохранение свойства управляемости системы.

Основным результатом данного исследования является найденная замена координат, позволяющая привести исходную модель к нормальной форме, исключив наличие нестационарного коэффициента усиления в цепочке интеграторов. Разработан алгоритм робастного управления на основе расширенного наблюдателя. Дальнейшее развитие работы заключается в разработке алгоритма динамической настройки коэффициентов регулятора.

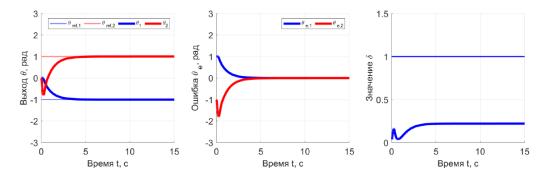


Рис. 1. Результаты моделирования для постоянного задающего сигнала

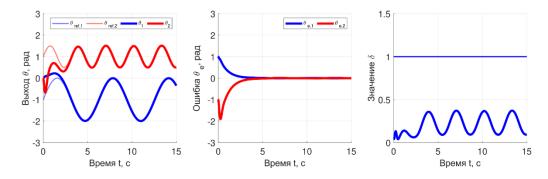


Рис. 2. Результаты моделирования для гармонического задающего сигнала

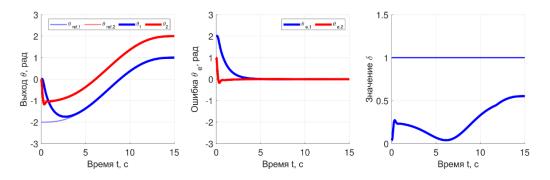


Рис. 3. Результаты моделирования для полиномиального задающего сигнала

Список использованных источников

- 1. Freidovich L., Khalil H. Performance Recovery of Feedback-Linearization-Based Designs // IEEE Transactions on Automatic Control. − 2008. − V. 53. − №. 10. − Pp. 2324–2334.
- 2. Borisov O., Isidori A., Kakanov M., Pyrkin A. Robust tracking control of a robot arm actuated by permanent magnet synchronous motors // International Journal of Robust and Nonlinear Control. − 2022. − V. 32. − №. 18. − Pp. 10358–10373.
- 3. Zhivitskii A., Borisov O., Dovgopolik I. Parameter Estimation and Indirect Adaptive Control of a Robot Arm // 8th International Conference on Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), Istanbul, Turkey. 2022. Pp. 1421–1426.

УДК 681.78

ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК КВАНТОВОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ

Завитаев А.С.^{1,2}, Евстифеев М.И.^{1,2}

1 - AO «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор»

2 – Университет ИТМО

e-mail: zav.al98@mail.ru

В работе рассматривается особенности проектирования оптической подсистемы квантового датчика вращения. Оценивается влияние топологии квантовой ячейки на мощность излучения лазера, сообщаемой ансамблю атомов, при наличии различных смещений. На основе полученных результатов формируются рекомендации к конструктивным параметрам ячейки для минимизации влияния смещений элементов оптической системы на характеристики квантового датчика вращения.

Ключевые слова

квантовый датчик вращения, гироскопия, технология, проектирование, оптическая ячейка.

Чувствительным элементов квантового датчика вращения (КДВ) является ячейка с ансамблем атомов, обладающих макроскопическим магнитным моментом. Принцип действия датчика основан на использовании эффекта ядерного магнитного резонанса, суть которого заключается в том, что под воздействием заданного магнитного поля магнитные моменты атомов переориентируются и начинают прецессировать вдоль вектора магнитного поля. Изменение частоты прецессии магнитного момента ядер в постоянном магнитном поле пропорционально угловой скорости вращения основания [1, 2].

Особенностью КДВ является его потенциальная нечувствительность к вибрационным воздействиям. Обоснованием этому служит индифферентность атомов внутри ячейки к внешним механическим воздействиям [3]. Однако в результате инерциальных воздействий возможны смещения различных элементов конструкции, в связи с чем могут изменяться параметры КДВ.

В работе рассматривается оптическая система датчика, ключевым элементом которой является оптическая ячейка. Анализ топологии ячейки при наличии смещений в оптической системе является актуальной задачей.

Оптическая система КДВ

В оптическую систему входят оптическая ячейка со специальной газовой средой внутри и лазеры детектирования и накачки. Для обеспечения прохождения лазера через ячейку применяются оптические делительные призмы и зеркало (рис. 1). В системе можно выделить два основных канала - накачки и детектирования. Первый необходим для создания условий для возникновения ядерного магнитного резонанса (ЯМР) и поддержания его в процессе работы датчика. Второй — для измерения угловой скорости вращения основания. Важно, чтобы в процессе работы геометрические параметры оптической системы оставались неизменными [5], что обусловлено зависимостью мощности излучения, сообщаемого атомам, от положения оптических элементов [6]. Кроме того, от мощности излучения зависит такой параметр, как ARW (angle random walk) датчика [4].

В работе рассматривается различная топология оптических ячеек, применяемых в КДВ. Исследуются кубические и сферические формы ячеек. В качестве изменяемого параметра используется толщина стенок ячейки, а критерием эффективности той или иной формы служит мощность излучения, сообщаемой ансамблю атомов внутри ячейки.

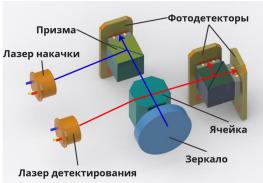


Рис. 1. Оптическая система

Влияние смещений на мощность излучения, переданной атомам. В работе рассмотрены линейные и угловые смещения оптической ячейки вдоль одной оси. Для расчета зависимости мощности излучения от смещений в оптической системе использовался модуль геометрической оптики в COMSOL Multiphysics. Он позволяет оценить путь луча лазера в зависимости от оптических параметров среды.

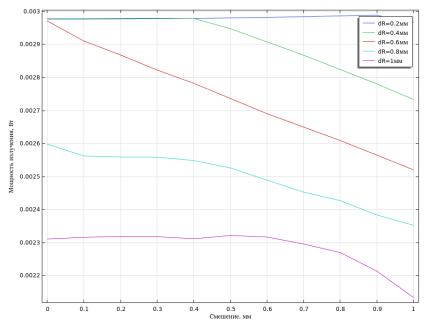


Рис. 2. Зависимость мощности излучения от линейного смещения сферической оптической ячейки

На рисунке 2 показана расчетная зависимость мощности излучения, сообщаемого атомам, от линейных смещений сферических оптических ячеек с различными толщинами стенок (dR). Зависимость проявляется в виде снижения мощности излучения при увеличении толщины стенок ячейки. Из графика можно видеть, что тонкостенные оптические ячейки (с толщиной стенки менее 0.5 мм) обладают свойством инвариантности к смещениям. Исходя из этого, можно сделать вывод, что посредством соблюдения определенных толщин стенки сферической ячейки возможно повысить устойчивость оптической системы к внешним механическим воздействиям.

На рисунке 3 представлена расчетная зависимость мощности излучения, сообщаемого атомам, от линейных смещений кубических оптических ячеек с различными толщинами стенок (dS). При отсутствии смещений максимальная мощность излучения, сообщаемого атомам, у кубической ячейки выше, чем у сферической. В результате расчетов показано, что у кубической ячейки не существует инвариантности к линейным смещениям при любой толщине стенки. В результате чего при возникновении смещений в оптической системе показатели мощности излучения, сообщаемой атомам внутри кубической ячейки, становятся хуже, чем у сферической.

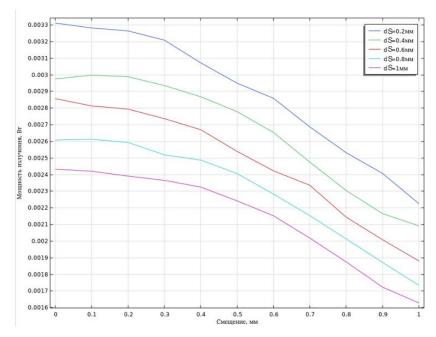


Рис. 3. Зависимость мощности излучения от линейного смещения кубической оптической ячейки

При моделировании угловых смещений выявлено, что они не оказывают существенного воздействия на мощность излучения в случае применения обоих видов ячейки.

Полученные результаты сведены в таблицу. Сравниваются оба вида ячеек с толщиной стенки 0.4 мм.

Таблица

Впияние смешений на мошность изпучения, переданного ансамблю атомов

Влияние отощения на тощноств изму нения, переданного аноатомов				
Форма ячейки dR = 0.4 мм	Смещения	% переданной мощности от лазера ансамблю атомов		
Сферическая	Без смещений	93		
	Линейные	81		
	Угловые	93		
Кубическая	Без смещений	100		
	Линейные	63		
	Угловые	91		

В работе проведен анализ топологии оптических ячеек. Рассмотрены различные формы, толщины стенок и смещения относительно номинального положения. Показано, что наиболее эффективно применение тонкостенных сферических ячеек для обеспечения инвариантности к угловым и поступательным смещениям. Полученные результаты создают основы для оптимизации конструкции ячейки.

Список использованных источников

- 1. Литманович Ю.А., Вершовский А.К., Пешехонов В.Г. Гироскоп на основе явления ядерного магнитного резонанса: прошлое, настоящее, будущее // Материалы пленарного заседания 7-й Российской мультиконференции по проблемам управления ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор». 2014. С. 35–42.
- 2. Шевченко А.Н., Захарова Е.А. Исследование зависимости качества резонанса от распределения цезия в ячейке квантового датчика вращения // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. − 2019. − Т. 19. − №. 4. − С. 567–573. DOI: 10.17586/2226-1494-2019-19-4-567-573.

- 3. Larsen M., Bulatowicz M. Nuclear magnetic resonance gyroscope: for DARPA's microtechnology for positioning, navigation and timing program // Proc. IEEE Int. FrequencyControl Symposium. 2012. DOI: 10.1109/fcs.2012.6243606.
- 4. Вершовский А.К., Литманович Ю.А., Пазгалев А.С., Пешехонов В.Г. Гироскоп на ядерном магнитном резонансе: предельные характеристики // Гироскопия и навигация. 2018. T. 26. № 1. C. 55-80. DOI 10.17285/0869-7035.2018.26.1.055-080.
- 5. Noor R.M., Shkel A.M. MEMS Components for NMR Atomic Sensors // Journal of Microelectromechanical Systems. 2018. Vol. 27. №. 6. Pp. 1148–1159. DOI: 10.1109/JMEMS.2018.2874451.
- 6. Evstifeev M.I., Zavitaev A.S. Estimation of the nuclear magnetic gyroscope sensitivity to inertial influences // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 2022. Vol. 1215. №. 012014. Pp. 1–8.

УДК 048

ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ

Захаров Д.В.¹ (студент) Научный руководитель – к.т.н, доцент Шилин И.А.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: dvzakharov@niuitmo.ru

В работе рассмотрено применение больших языковых моделей и мультиагентных систем на их основе для решения математических задач. Основная цель исследования – повышение точности автоматической генерации решений математических задач большими языковыми моделями. В перспективе результаты работы могут применяться для автоматической генерации доказательств различных теорем и поиска ошибок в предложенных доказательствах.

Ключевые слова

Большие языковые модели, LLM, мультиагентные системы, MAS, автоматическая генерация.

В последние годы большие языковые модели (LLM) стали одной из самых значимых технологических инноваций в области искусственного интеллекта и обработки естественного языка. Эти модели, обученные на огромных объемах текста, способны генерировать высококачественные тексты, понимать и генерировать речь, а также выполнять другие задачи, связанные с обработкой естественного языка [1]. При этом существуют такие задачи, в которых LLM по тем или иным причинам не всегда позволяют достичь требуемой точности. Одной из таких задач является автоматическая генерация решений и доказательств в математике и других точных науках [2]. К сожалению, большие языковые модели достаточно часто делают ошибки и генерируют некачественные решения. С другой стороны, существуют мультиагентные системы (MAS), агенты в которых способны взаимодействовать друг с другом для совместного решения той или иной задачи. В контексте автоматической генерации решений кажется логичным использовать LLM в качестве агентов мультиагентной системы, чтобы находить и автоматически исправлять допущенные большой языковой моделью ошибки. В данной работе был выполнен анализ больших языковых модели и мультиагентных систем, а также проведен эксперимент по автоматической генерации решений систем уравнений методом Крамера.

Как уже было сказано выше, большие языковые модели представляют собой класс глубоких нейронных сетей, обученных на огромных объемах текстовых данных. Одним из ключевых принципов их функционирования является применение трансформерных архитектур. Данная архитектура позволяет модели обрабатывать последовательности данных с учетом их контекста и взаимосвязей, а механизм внимания (attention mechanism) играет ключевую роль в эффективной обработке длинных текстовых последовательностей.

Важно отметить, что большие языковые модели, такие как GPT, имеют множество параметров, что делает их мощнейшими инструментами для решения различных задач, но также требует значительных вычислительных ресурсов для обучения, развертывания на сервере и использования. В связи с последним пунктом появились более компактные модели, которые можно запустить локально, на личном компьютере. К подобным моделям относятся Llama, Mistral, Alpaca и другие. Против 175 миллиардов параметров у GPT-3, такие модели имеют 5–11 миллиардов параметров. Чаще всего, со снижением числа параметров, снижается и качество генерации ответов, но они все еще способны генерировать результаты, которые возможно использовать. В рамках исследования были рассмотрены ChatGPT-3.5-turbo

(175 млрд параметров), Mistral-7B, Llama-2-7b и аlpaca-7b (модели с 7 млрд параметров каждая). Все рассмотренные модели, за исключением chatGPT необходимо разворачивать на собственном сервере, а также донастраивать формат выходных данных для построения мультиагентной системы. При этом chatGPT является платным решением, все остальные модели можно использовать без какой-либо оплаты. Исходя из всего этого, все эксперименты в рамках исследования выполнялись на основе модели chatGPT-3.5-turbo. Результаты работы данной модели можно сформировать по API и формат выходных данных не требует донастроки для построения мультиагентной системы. Также, у модели есть бесплатный ограниченный доступ, которого достаточно для проведения текущего эксперимента, что нивелирует необходимость оплаты.

В качестве математической задачи для экспериментов было решено взять автоматическую генерацию решений систем уравнений методом Крамера. Задача с одной стороны простая, с другой уже является достаточно комплексной для проверки модели. Было рассмотрено 5 простых систем уравнений. Во избежание ошибок в ходе решения, сгенерированные ответы были проверены экспертами. Каждое решение классифицировалось как корректное или некорректное. При выполнении оценки эксперты получали только сформированное решение, которое не содержало данных о решающей системе. Оценивались насколько ход решения верен и точность ответа. Так как задачи простые и имеют единственное решение, во всех пяти рассматриваемых случаях оценки экспертов совпали. В качестве метрики для оценки была выбрана ассигасу, так как достаточно понимания, верно ли модель решила задачу или нет. Пример запроса к LLM представлен ниже:

```
Solve the system of equations using the Kramer method:
\left\{
\begin{aligned}
2x+3y=12,\\
3x+2y=13.
\end{aligned}
\right
```

Далее менялись только сами уравнения. По результатам проведенного эксперимента, модель сгенерировала верные решения лишь для трех систем уравнений из пяти предложенных (ассигасу 0.6). В остальных модель допустила вычислительные ошибки.

После исследования LLM и проведения эксперимента были рассмотрены мультиагентные системы. Как уже было сказано выше, MAS представляют собой область исследования и разработки, фокусирующуюся на моделировании и анализе взаимодействия множества автономных агентов в динамической среде [3]. Агенты в мультиагентных системах обладают способностью принятия решений, действуют автономно и взаимодействуют друг с другом для достижения общих целей или решения сложных задач. Основными чертами мультиагентных систем являются децентрализованность, автономность и способность к адаптации. За счет запоминания контекста большими языковыми моделями, генерации более информативных ответов и понимания сложных инструкций, их применение в качестве агентов MAS может повысить и улучшить коммуникацию между агентами системы, что в свою очередь сможет привести к повышению качества решения задач [4].

Для построения MAS с LLM в качестве агентов компанией Microsoft был разработан фреймворк руанtogen. Он позволяет подключить необходимую модель и работать с ней как с разными агентами в автоматическом режиме [5]. Данный фреймворк появился летом 2023 года и на данный момент является одним из самых адаптированных для построения мультиагентных систем с LLM на языке Python. Также в рамках исследования был рассмотрен фреймворк ChatDev, но он направлен на моделирование только в сфере написания и дополнения кода. В связи с этим для проведения эксперимента был выбран именно руанtogen.

После анализа был также проведен описанный выше эксперимент по генерации решений систем уравнений методом Крамера, но при помощи MAS. Мультиагентная система,

разработанная для эксперимента, состояла из трех агентов: пользователя, задающего задачу, эксперта, решающего систему уравнений и ассистента, проверяющего, насколько эксперт решил задачу верно. В качестве агентов была также взята модель chatGPT-3.5-turbo. По его результатам, система не ошиблась в решениях ни разу (ассигасу 1), все допущенные LLM ошибки были исправлены автоматически.

Таким образом, даже на столь небольшой выборке задач, мультиагентная система показывает себя лучше простой LLM. При этом не следует забывать о том, что за счет большего числа обращений к модели от MAS для генерации потребуется большее число вычислительных и, в случае chatGPT и других платных моделей, финансовых ресурсов.

В рамках проведенного исследования больше внимания уделялось изучению концепций LLM и MAS. Дальнейшим его развитием будет изменение LLM, выступающих в качестве агентов, в частности, предлагается сравнить точность генерации решений математических задач моделями с меньшим числом параметров, таким как Llama и Mistral. При этом полученные результаты уже могут быть полезны для решения более сложных задач, таких, например, как математические доказательства различных теорем и поиск ошибок в предложенных доказательствах. В дальнейшем проведенное исследование может существенно облегчить работу математикам, физикам и другим ученым, сталкивающимся с необходимостью доказывать то или иное утверждение, тезис или теорему.

Список использованных источников

- 1. Naveed H., Khan H. U., Qiu S., Saqib M., Anwar S, Usman M., Akhtar N., Barnes N, Mian A. A Comprehensive Overview of Large Language Models. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2307.06435 (дата обращения: 10.11.2023).
- 2. Ahn J., Verma R., Lou R., Liu D., Zhang R., Yin W. Large Language Models for Mathematical Reasoning: Progresses and Challenges. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/html/2402.00157v1 (дата обращения: 25.11.2023).
- 3. Uhrmacher A. M., Weyns D. Multi-Agent Systems: Simulation and Applications. CRC Press, 2009. 582 p.
- 4. Nascimento N., Alencar P., Cowan D. Self-Adaptive Large Language Model (LLM)-Based Multiagent Systems. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2307.06187 (дата обращения: 07.12.2023).
- 5. Документация по фреймворку pyautogen от Microsoft. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://microsoft.github.io/autogen/docs/Getting-Started/ (дата обращения: 08.01.2024).

УДК 681.5

ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СЛЕЖЕНИЯ ЗА КУРСОМ НАДВОДНОГО СУДНА

Панин А.Д. 1 (студент), Захаров Д.Н. 1 (аспирант), Живицкий А.Ю. 1 (аспирант) Научный руководитель — с.н.с. Борисов О.И. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: 312636@edu.itmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В данной статье предлагаются методы синтеза алгоритмов управления для решения задачи слежения за курсом для надводного судна. Данная задача была решена и смоделирована с использованием различных алгоритмов управления. Предложенные алгоритмы могут быть использованы в будущем для решения задач динамического позиционирования и движения по заданной траектории.

Ключевые слова

Управление курсом, адаптивное управление, робастное управление, надводные суда, моделирование динамики судна.

Управление курсом судна играет ключевую роль в глобальной логистике, поскольку оно необходимо для обеспечения безопасности навигации, оптимизации маршрутов, экономии топлива и повышения энергоэффективности судоходства.

Разработка алгоритмов управления курсом судна имеет первостепенное значение в современных автоматических системах управления судном. Эти алгоритмы должны быть высокоточными и способными учитывать различные факторы, такие как погодные условия, течения, другие суда и географические особенности маршрута.

Проблема управления нелинейными системами в условиях значительного отсутствия априорной информации как о динамике объекта, так и о его окружающей среде, является одной из актуальных и наиболее значимых границ в области теории систем управления. Задача состоит в синтезе математически обоснованных алгоритмов управления для систем, характеризующихся сложной нелинейной динамикой, которые позволят достичь желаемых свойств устойчивости с гарантированными показателями качества переходных процессов в условиях отсутствия информации об объекте и рабочей среде. Ключевым подходом к решению таких проблем является поиск баланса между сложностью алгоритмов, аналитическое обоснование которых требует принятия ряда предположений, и их осуществимостью на практике. Зачастую результаты теоретических исследований и разработок для обеспечения достижения целей управления требуют условий и предположений, выполнение которых на практике может быть затруднительным, и, следовательно, внедрение таких результатов в системы управления требует дополнительной доработки. Таким образом, будут востребованы только те научно-технические результаты, которые имеют строгое аналитическое обоснование и возможность реализации на реальном объекте.

Целью данной работы является разработка и исследование алгоритмов управления для наводного судна. Первым шагом необходимо сформировать модель, на основе которой будет синтезировано управление. Модель динамики судна, как описано в источниках [1, 2, 3], включает различные силы и моменты, влияющие на движение судна. Эти воздействия могут быть классифицированы следующим образом:

- гидродинамические воздействия (X_H, Y_H, M_H) ;
- воздействие винта (T_v) ;

- воздействие руля (X_R, Y_R, M_R) ;
- воздействие ветра и волны (F_x, F_y, M_z) .

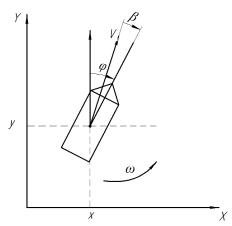


Рис. 1. Модель корабля

На основе второго закона Ньютона можно сформулировать систему из трех дифференциальных уравнений

$$\dot{V}_{\chi} = \frac{1.8T_v - X_H - X_R + m(1 - k_{22})V_y\omega + F_{\chi}}{m(1 + k_{11})},$$

$$\dot{V}_{y} = \frac{Y_H + Y_R + F_{y}}{m(1 + k_{22})},$$

$$\dot{\omega} = \frac{M_H + M_R + M_z}{I_{ZZ}(1 + k_{66})}.$$

Гидродинамические воздействия, действующие на судно, рассчитываются с использованием следующих математических выражений

$$\begin{split} X_{H} &= A_{1}(1-\Omega^{2})V_{l}^{2},\\ Y_{H} &= A_{2}V_{l}^{2}\beta + A_{3}V_{l}^{2}\Omega\sqrt{1-\Omega^{2}},\\ M_{H} &= A_{4}V^{2}\beta + A_{5}V_{l}^{2}\Omega + A_{6}V_{l}^{2}\Omega|\beta| + A_{7}V_{l}^{2}\Omega|\Omega|, \end{split}$$

где используются следующие вспомогательные переменные

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2},$$

$$V_l = \sqrt{V^2 + \omega^2 L^2},$$

$$\Omega = \frac{\omega L}{V_l},$$

$$\beta = -arctg\left(\frac{V_y}{V_x}\right).$$

Воздействие винта включает в себя тяговую силу, которая определяется формулой

$$T_{v} = 9.74n^2 - 2.23Vn,$$

где n — заданное количество оборотов в секунду.

Воздействие руля определяется следующими формулами:

$$X_{R} = A_{8}\alpha^{2}V_{lr}^{2},$$

$$Y_{R} = A_{9}V_{lr}^{2}\beta + A_{10}V_{lr}^{2}\widetilde{\omega} + A_{11}V_{lr}^{2}\delta,$$

$$M_{R} = A_{12}V_{lr}^{2}\beta + A_{13}V_{lr}^{2}\widetilde{\omega} + A_{14}V_{lr}^{2}\delta,$$

где используются следующие вспомогательные переменные

$$\alpha = \delta - \left(\beta + \frac{L_R \omega}{V}\right),$$

$$V_{lr} = \sqrt{V^2 + L_R^2 \omega^2},$$

$$\widetilde{\omega} = \frac{\omega L}{V_{lr}}.$$

Целью управления является сведение ошибки к нулю и математически выражается следующим образом

$$\lim_{t\to\infty}\parallel e\parallel=0,$$

где $e=\varphi_{ref}-\varphi(t)$ – ошибка между текущим углом курса φ и целевым φ_{ref} . Путем линеаризации модели

$$\begin{cases} \dot{\beta} = a_{11}(V)\beta + a_{12}(V)\omega + b_1(V)\delta, \\ \dot{\omega} = a_{21}(V)\beta + a_{22}(V)\omega + b_2(V)\delta' \\ \dot{\varphi} = \omega, \\ \dot{\delta} = u \end{cases}$$

Для удобства перепишем систему в матричную форму ВСВ

$$\begin{bmatrix} \dot{\beta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{\varphi} \\ \dot{\delta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11}(V) & a_{12}(V) & 0 & b_{1}(V) \\ a_{21}(V) & a_{22}(V) & 0 & b_{2}(V) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega \\ \varphi \\ \delta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} u,$$

$$\begin{bmatrix} \varphi \\ \delta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \beta \\ \omega \\ \varphi \\ \delta \end{bmatrix}.$$

Следующий шаг влечет за собой разработку управления вида u = Kx с использованием известных методов управления, таких как модальное управление, методы линейного квадратичного регулятора (LQR) и линейных матричных неравенств (LMI).

Последовательный компенсатор — алгоритм, использующий концептуальное поведение системы, представленное в виде передаточной функции. В частности, цель состоит в том, чтобы найти передаточную функцию от u к φ , используя следующую формулу

$$W_{u \to \varphi} = [0 \quad 0 \quad 1 \quad 0](sI - A)^{-1}B.$$

Передаточная функция преобразуется к следующему виду

$$W_{u\to\varphi} = \frac{k_1 s + k_2}{k_3 s^4 + k_4 s^3 + k_5 s^2},$$

где k_i – произвольные константы. Относительный динамический порядок этой передаточной функции непосредственно влияет на синтез управления. В данном случае он равен 3. Управление будет принято в следующем виде

$$u = -\mu \cdot \alpha(s) (\varphi - \varphi_{ref}),$$

где μ — настроечный положительный коэффициент, $\alpha(s)$ — компенсирующий полином, степень которого на 1 меньше относительного динамического порядка передаточной функции $W_{u\to \varphi}$, с корнями, имеющими отрицательную вещественную часть, φ — текущий курс, φ_{ref} — целевой курс.

Операцию умножения $\alpha(s)(\varphi-\varphi_{ref})$ можно определить как в [4]:

Пусть a и b являются корнями $\alpha(s)$

$$\alpha(s) = s^2 + (a+b)s + ab.$$

В результате умножения получается

$$\alpha(s)(\varphi - \varphi_{ref}) = \ddot{\varphi} + (a+b)\dot{\varphi} + ab(\varphi - \varphi_{ref}) = = \dot{\omega} + (a+b)\dot{\varphi} + ab(\varphi - \varphi_{ref}).$$

Из этих трех величин только ϕ измеряема. Остальные производные будут восстановлены с использованием наблюдателя

$$\begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\varphi} \end{bmatrix} + L \left(\varphi - \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega} \\ \hat{\varphi} \end{bmatrix} \right),$$

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Используя преимущества линейного квадратичной наблюдателя (LQE), управление будет выглядеть следующим образом

$$u = -\mu \cdot \alpha(s) (\varphi - \varphi_{ref}) = -\mu (\dot{\hat{\omega}} + (a+b)\dot{\hat{\varphi}} + ab(\varphi - \varphi_{ref})).$$

Следующий подход — адаптивный регулятор по ошибке. Данный подход предполагает определение ошибки между текущим целевым курсами. После по передаточной функции от управления к ошибке синтезируется закон таким образом, чтобы ошибка экспоненциально стремилась к 0.

Алгоритм синтеза:

Ошибка

$$e = \varphi_{ref} - \varphi$$
.

Далее требуется рассчитать производные до тех пор, пока не появится выражение с u

$$\begin{split} \ddot{e} &= -\omega, \\ \ddot{e} &= -\dot{\omega} = -\frac{M_H + M_R}{J_{zz}(1 + k_{66})}, \\ \ddot{e} &= -\frac{d}{dt} \left(\frac{A_4 V^2 \beta + A_5 V_l^2 \Omega + A_6 V_l^2 \Omega |\beta| + A_7 V_l^2 \Omega |\Omega|}{J_{zz}(1 + k_{66})} + \frac{A_{12} V_{lr}^2 \beta + A_{13} V_{lr}^2 \widetilde{\omega} + A_{14} V_{lr}^2 \delta}{J_{zz}(1 + k_{66})} \right) = \\ &= -\frac{d}{dt} \left(\frac{A_4 V^2 \beta + A_5 V_l^2 \Omega + A_6 V_l^2 \Omega |\beta| + A_7 V_l^2 \Omega |\Omega|}{J_{zz}(1 + k_{66})} + \frac{A_{12} V_{lr}^2 \beta + A_{13} V_{lr}^2 \widetilde{\omega}}{J_{zz}(1 + k_{66})} \right) - \frac{2A_{14} V_{lr} \delta + A_{14} V_{lr}^2 u}{J_{zz}(1 + k_{66})} = \\ &= A - \frac{2A_{14} V_{lr} \delta + A_{14} V_{lr}^2 u}{J_{zz}(1 + k_{66})}. \end{split}$$

Затем будет определена передаточная функция от входа к ошибке

$$s^{3}e = A - \frac{2A_{14}V_{lr}\delta + A_{14}V_{lr}^{2}u}{J_{zz}(1 + k_{66})},$$

$$e = \frac{A - \frac{2A_{14}V_{lr}\delta + A_{14}V_{lr}^{2}u}{J_{zz}(1 + k_{66})}}{s^{3}}.$$

После задается желаемая динамика ошибок

$$\dot{e} = -Ke$$
.

Тогда передаточная функция от управления к производной ошибки выражается

$$\dot{e} = \frac{A - \frac{2A_{14}V_{lr}\delta + A_{14}V_{lr}^2u}{J_{zz}(1+k_{66})}}{\varsigma^2} = -Ke.$$

Таким образом, управление выражается в виде

$$u = \frac{\left(A - s^2(-Ke)\right)J_{zz}(1 + k_{66}) - 2A_{14}V_{lr}\delta}{A_{14}V_{lr}^2},$$
$$u = \frac{\left(A + K\ddot{e}\right) - \frac{2A_{14}V_{lr}\delta}{J_{zz}(1 + k_{66})}}{\frac{A_{14}V_{lr}^2}{J_{zz}(1 + k_{66})}},$$

где $\ddot{e} = -\dot{\omega}$.

Далее, с помощью метода динамического расширения и смешивания регрессора (DREM), описанного в [5], определяются параметры A_4 - A_7 и A_{12} - A_{14} деленные на $J_{zz}(1+k_{66})$. Для этого уравнение

$$\begin{split} \dot{\omega} &= \frac{A_4 V^2 \beta + A_5 V_l^2 \Omega + A_6 V_l^2 \Omega |\beta| + A_7 V_l^2 \Omega |\Omega|}{J_{zz} (1 + k_{66})} + \\ &+ \frac{A_{12} V_{lr}^2 \beta + A_{13} V_{lr}^2 \widetilde{\omega} + A_{14} V_{lr}^2 \delta}{J_{zz} (1 + k_{66})} \end{split}$$

переписывается в форме линейной регрессии $y = \omega^T \theta$

$$\begin{split} \dot{\omega} &= [V^2\beta \quad V_l^2\Omega \quad V_l^2\Omega|\beta| \quad V_l^2\Omega|\Omega| \quad V_{lr}^2\beta \quad V_{lr}^2\widetilde{\omega} \quad V_{lr}^2\delta] \cdot \\ & \cdot [A_4 \quad A_5 \quad A_6 \quad A_7 \quad A_{12} \quad A_{13} \quad A_{14}]^T \frac{1}{J_{zz}(1+k_{66})}. \end{split}$$

Затем с помощью фильтра $1/K_s$ получается система из 7 дифференциальных уравнений. Далее вычисляются $\Delta = \det(M)$, $\varepsilon = \operatorname{adj}(M)Y$, где

$$Y = \begin{bmatrix} \dot{\omega} & \frac{1}{K_S} \dot{\omega} & \cdots & \frac{1}{K_S^6} \dot{\omega} \end{bmatrix}^I,$$

$$M = \begin{bmatrix} V^2 \beta & V_l^2 \Omega & V_l^2 \Omega |\beta| & V_l^2 \Omega |\Omega| & V_{lr}^2 \beta & V_{lr}^2 \widetilde{\omega} & V_{lr}^2 \delta \\ \frac{V^2 \beta}{K_S} & \frac{V_l^2 \Omega}{K_S} & \frac{V_l^2 \Omega |\beta|}{K_S} & \frac{V_l^2 \Omega |\Omega|}{K_S} & \frac{V_{lr}^2 \beta}{K_S} & \frac{V_{lr}^2 \widetilde{\omega}}{K_S} & \frac{V_{lr}^2 \delta}{K_S} \\ & \vdots & & & & \\ \frac{V^2 \beta}{K_S^6} & \frac{V_l^2 \Omega}{K_S^6} & \frac{V_l^2 \Omega |\beta|}{K_S^6} & \frac{V_l^2 \Omega |\Omega|}{K_S^6} & \frac{V_{lr}^2 \beta}{K_S^6} & \frac{V_{lr}^2 \widetilde{\omega}}{K_S^6} & \frac{V_{lr}^2 \widetilde{\omega}}{K_S^6} \end{bmatrix},$$

где $K_s = s + 1$.

После этого θ_i находятся как решения дифференциальных уравнений

$$\dot{\theta}_i = -k_i(\Delta^2 \theta_i - \Delta \varepsilon_i),$$

где k_i – коэффициент, отвечающий за скорость сближения.

Затем найденные значения используются при формировании управления.

При рассмотрении движения судна в условиях морского волнения математическое моделирование сильно усложняет динамику системы, поэтому применяется аппроксимация. Для математической аппроксимации волновой модели воздействия обычно представлены конечным числом гармонических колебаний с различными частотами, амплитудами и фазовыми углами.

При рассмотрении сценария, в котором судно сталкивается с обычными морскими волнами, указываются такие характеристики, как граница, амплитуда (половина высоты волны),

фазовый угол и угол направления движения. Предполагается, что судно движется по курсу с заданной скоростью и углом дрейфа.

Воздействие судна в возмущенной водной среде в горизонтальной плоскости определяется проекциями силы и момента вдоль осей соответствующей системы координат

$$\begin{split} X_{w}(t) &= \rho V_{o}(1+k_{11})\sigma^{2}\cos\chi_{0}\kappa_{1}a\sin(\sigma_{k}t+\varepsilon),\\ Y_{w}(t) &= \rho V_{o}\left(1+k_{22}\frac{\sigma_{k}}{\sigma}\right)\sigma^{2}\sin\chi_{0}\kappa_{1}a\sin(\sigma_{k}t+\varepsilon),\\ M_{zw}(t) &= -[\frac{J_{Z}}{g}\sigma^{4}\kappa_{2}\left(1+k_{66}\frac{\sigma_{k}}{\sigma}\right)\cos\chi_{0} -\\ &-\rho V_{o}k_{22}V\sigma\kappa_{1}]\sin\chi_{0}a\cos(\sigma_{k}t+\varepsilon). \end{split}$$

В эти формулы введены следующие дополнительные обозначения:

 χ_0 – угол между вектором скорости волны (направлением распространения волны) и вектором скорости судна, определяемый по формуле

$$\chi_0 = \gamma_w - \varphi + \beta,$$

 σ_k — кажущаяся частота волны

$$\sigma_k = \sigma - \frac{V\sigma^2}{g} \cos \chi_0,$$

 $\kappa_1 = \kappa_1(\bar{\sigma}), \; \kappa_2 = \kappa_2(\bar{\sigma})$ — редукционные коэффициенты зависящие от вспомогательного параметра

$$\bar{\sigma} = 0.0102\sigma^2 L |\cos \chi_0|$$
.

Более подробную информацию можно найти в следующем источнике [3].

При движении в условиях нерегулярных волн общее воздействие на судно может быть представлено с достаточной степенью точности в виде аддитивной смеси конечного набора различных гармоник, соответствующих спектральной плотности волн.

Далее силы и моменты, определяемые аэродинамическими свойствами надводной части корпуса судна, без учета понтона, рассчитываются по следующим формулам

$$X_{a} = \frac{\rho_{a}V_{k}^{2}}{2} A_{X} C_{xa}(\gamma_{k}),$$

$$Y_{a} = \frac{\rho_{a}V_{k}^{2}}{2} A_{Y} C_{ya}(\gamma_{k}),$$

$$M_{a} = -Y_{a} \bar{x}_{a} L,$$

где \bar{x}_a – координата центра паруса, V_k – кажущаяся скорость ветра, γ_k – кажущийся угол ветра, ρ_a – плотность воздуха, A_x и A_y – лобовая и боковая области парусности соответственно. Координата центра парусности и аэродинамические коэффициенты определяются выражениями

$$\bar{x}_a = -0.25\cos\gamma_k + 0.09|\sin\gamma_k|,$$

$$C_{xa}(\gamma_k) = \cos\gamma_k,$$

$$C_{ya}(\gamma_k) = 0.22\sin\gamma_k + 0.83(\sin\gamma_k)^3.$$

Моделирование проводилось при скорости 15 узлов, высоте волн 0.5 метра и скорости ветра 5 м/с. Модели для ветра и волн были построены следующим образом (рис. 2–11).

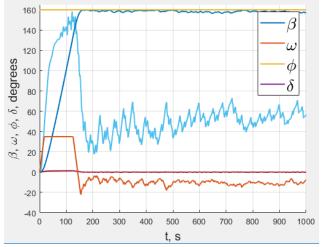


Рис. 2. График вектора состояния, LQR-регулятор

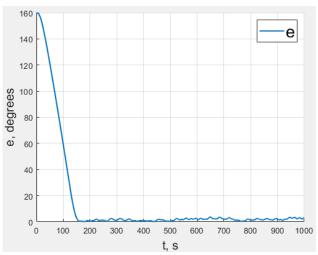


Рис. 3. График ошибки, LQR-регулятор

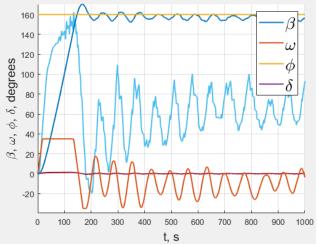


Рис. 4. График вектора состояния, LMIрегулятор

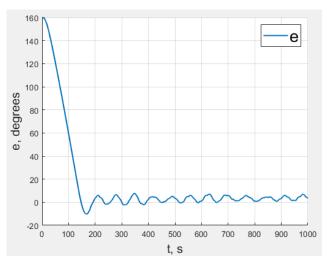


Рис. 5. График ошибки, LMI-регулятор

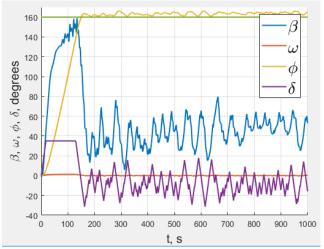


Рис. 6. График вектора состояния, модальный регулятор

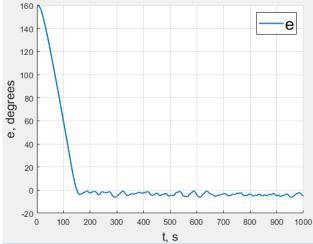
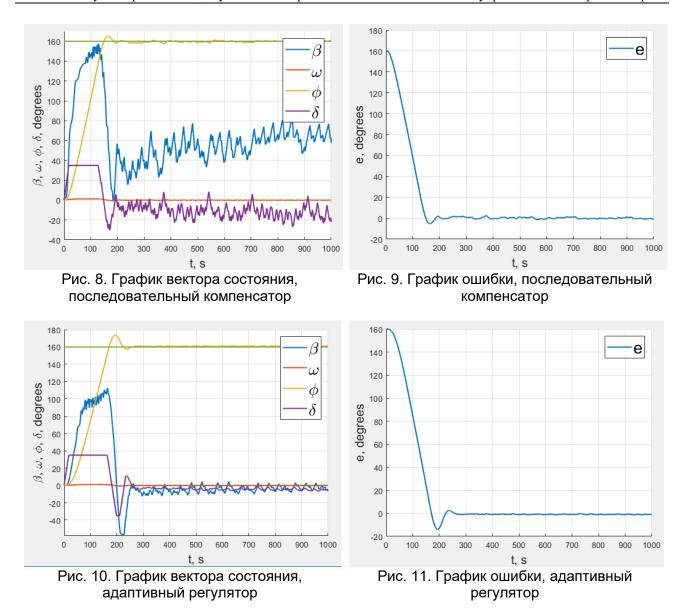


Рис. 7. График ошибки, модальный регулятор



Сравнительные характеристики переходных процессов для различных регуляторов приведены в таблице.

Сравнение переходных характеристик

Таблица

epasionio nepekerinsik kapaktepitetik				
Алгоритм	Время переходного процесса, с	Перерегулирование, %	Установившаяся ошибка, °	
LQR	160	_	2	
LMI	200	7	3-4	
Модальный регулятор	160	4	2	
Последовательный компенсатор	180	3	1	
Адаптивный регулятор	220	8	<1	

В ходе этого исследования была построена модель судна, синтезировано несколько законов управления для решения задачи слежения и проведен сравнительный анализ. В результате было установлено, что в среднем лучше всего работает последовательный компенсатор. Данный алгоритм приводит к небольшому перерегулированию и небольшой

средней установившейся ошибке по сравнению с другими алгоритмами. Однако, если требуется точное отслеживание курса, то адаптивный подход дает меньшую установившуюся ошибку. В будущем планируется провести испытания на реальном стенде и сравнить полученные алгоритмы на практике.

Список использованных источников

- 1. Fossen T.I. Models for ships, offshore structures and underwater vehicles // Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons, Ltd. 2011. Pp. 133–186.
- 2. Лукомский Ю.А., Чугунов В.С. Системы управления морскими подвижными объектами // Л.: Судостроение, 1988. 272 с.
- 3. Войткунский Я.И. Справочник по теории корабля. Т. $3/\Pi$ од ред. ЯИ Войткунского. // Л.: Судостроение. -1985.-541 с.
- 4. Borisov O.I. et al. Output robust control with anti-windup compensation for robotic boat // 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). IEEE. 2016. Pp. 13–18.
- 5. Borisov O.I. et al. Adaptive tracking of a multi-sinusoidal signal with drem-based parameters estimation // IFAC-PapersOnLine. 2017. T. 50. №. 1. Pp. 4282–4287.

УДК 62-213.2;62-503.54

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА ДЛЯ БИОНСПИРИРОВАННОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА-ЧЕРЕПАХИ

Патрашевский $A.A.^1$ (студент), Коваленко П.П. 1 , Маматов $A.\Gamma.^1$ Научный руководитель — к.т.н. Коваленко П.П. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: patrashevskiya@gmail.com

В данной работе рассмотрены аспекты проектирования привода на базе двигателя постоянного тока для бионспирированного подводного робота. В ходе работы были решены задачи анализа гидродинамических показателей системы, произведен расчет и выбор двигателя, проведены расчеты на статические деформации и синтезирована система управления. По результатам работы был намечен вектор дальнейших задач.

Ключевые слова

Двигатель постоянного тока, бионспирированный подводный робот, гидродинамика, метод конечных элементов, подчинённое регулирование.

Подводные аппараты с дистанционным управлением с винтовым приводом имеют широкую распространённость при выполнение различных подводных операций, однако обладают рядом недостатков таких как: повышенная травмоопасность при коллаборативном использовании, высокие значения гидроакустических шумов [1]. Для решения этих проблем используются биомиметические роботы, которые имитируют форму и механизм движения биологических существ.

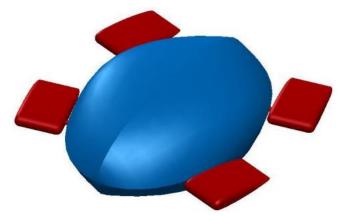


Рис. 1. Концепт подводного биомиметического робота

На рисунке 1 представлен концепт робота, для которого произведено проектирование привода. Синим цветом обозначен корпус робота, красным — движитель. Движение робота обеспечивается благодаря попеременной парной работе движителей.

Проектирование можно условно разделить на три этапа: анализ гидродинамических показателей; конструирование системы гидроизоляции и расчет деформаций; синтез системы управления (СУ). Для решения первого этапа было проведено моделирование движения движителя робота в платформе для численного моделирования задач гидродинамики — OpenFoam, цель которого заключалась в поиске гидродинамического момента сопротивления τ_z и его коэффициента C_m [2].

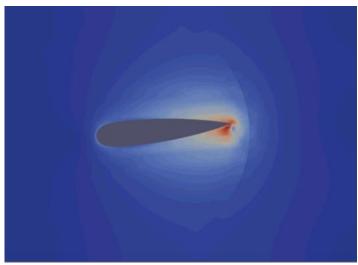


Рис. 2. Визуализация движения движителя в системе ParaView

При моделировании было сделано допущение о том, что движитель является абсолютно твердым телом, движение которого описывается гармоническим сигналом

$$\theta = A\sin(\omega t + \phi), \tag{1}$$

где θ — угловое положение движителя, A — амплитуда колебания, ω — угловая частота, ϕ — угол сдвига фазы сигнала. Полученные результаты моделирования представлены на рисунке 3.

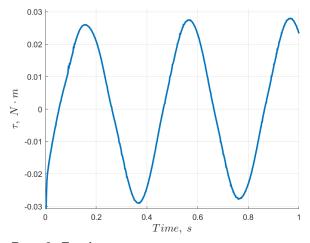


Рис. 3. График зависимости τ_z от времени

Полученные значения используются для определения необходимой мощности P и крутящего момента $M_{\it m}$ двигателя:

$$P = M_m \dot{\theta} \,, \tag{2}$$

$$J\frac{d\dot{\theta}}{dt} = M_m - M_L, \tag{3}$$

где J – момент инерции движителя, $M_L = \tau_z$ – момент нагрузки. В соответствии с полученными значениями для дальнейшего проектирования был выбран двигатель постоянного тока (ДПТ) Maxon RE 16 в комплекте с планетарным редуктором GP 16A.

Ввиду наличия коллекторно-щеточного узла у выбранного двигателя, а также чувствительности металлических элементов редуктора к макроэлементам, которые могут быть растворены в жидкостной среде, необходимо обеспечить привод системой гидроизоляции, которая изображена на рисунке 4

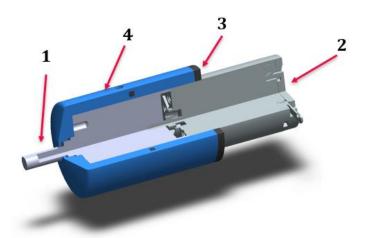


Рис. 4. Сечение системы гидроизоляции привода: 1 – планетарный редуктор GP 16A, 2 – двигатель постоянного тока RE 16, 3 – набор уплотнительных колец и прокладок, 4 – пластиковая накладка

Основными элементами, которые призваны не допустить попадание воды внутрь, служит система из силиконовых прокладок с уплотнительными кольцами и специальная накладка из AБС – пластика.

Ввиду того, что пластиковая накладка является несущим элементом и подвержена гидростатическому давлению был проведен анализ на статические деформации в среде Similation для системы автоматического проектирования SolidWorks с помощью метода конечных элементов. Анализ деформаций конструкции проводился на глубине $h=40\,\mathrm{M}$, давление p на которой было определено из:

$$p = \rho g h, \tag{4}$$

где ρ – плотность жидкостной среды, g – ускорение свободного падения. По результатам анализа, которые отображены на рисунке 5, отчетливо видно, что возникшие напряжения по 3-й теории прочности не превышают допустимые, которые определяются для предела текучести материала

$$[\sigma] \le 0.5\sigma_{c} \tag{5}$$

где [σ] — допустимые напряжения, σ_t — предел текучестям материала. Для АБС — пластика среднее значение σ_t = 38.8 МПа. Таким образом, данная конструкция может успешно эксплуатироваться на глубине до 40 м.

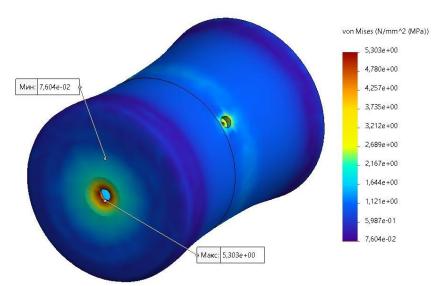


Рис. 5. Эпюра напряжений для пластиковой накладки

На рисунке 6 отображен привод подводного бионспирированного робота — черепахи в собранном состоянии. Фиксация элементов между собой обеспечивается винтами с повышенной коррозионной стойкостью. Для повышения создаваемой силы тяги движителем, изготовление которого целесообразно из гибких материалов [3], например силикона.

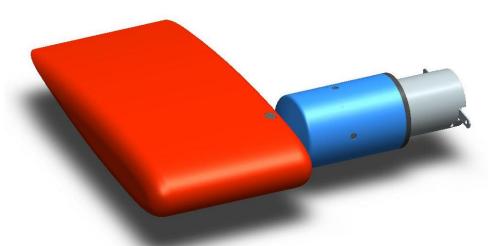


Рис. 6. Привод подводного робота

Завершающим этапом было проведено имитационное моделировании системы в среде MATLAB/Simulink, в которую заранее были экспортированы модели из SolidWorks. В качестве СУ двигателем используется метод подчиненного регулирования [4]. Для математического описания ДПТ с независимым возбуждением используется система линейных дифференциальных уравнений

$$L\frac{di}{dt} = U - Ri - \psi \dot{\theta} , \qquad (6)$$

$$J_{s} \frac{d\dot{\theta}}{dt} = \psi i - M_{L}, \tag{7}$$

где L — индуктивность обмоток якоря, i — ток якоря, U — напряжение, R — активное сопротивление обмоток якоря, ψ — потокосцепление, J_s — суммарный приведенный к валу двигателя момент инерции. В первую очередь происходит настройка контура тока на линейный оптимум. Для этого применяется преобразование Лапласа к (6) с допущением, о том что вал двигателя заторможен, которое позволяет получить передаточную функцию (ПФ) $W_{sys}(s)$ от напряжения U к току i

$$\theta = A\sin(\omega t + \phi), \tag{1}$$

где T_e — электромагнитная постоянная времени двигателя. Для завершения синтеза регулятора тока поделим ПФ линейного оптимума $W_{ol}(s) = 1/(T_t s)$ на ПФ объекта и получим выражение для искомого регулятора $W_{cr}(s)$

$$W_{cr}(s) = \frac{W_{ol}(s)}{W_{evr}(s)} = \frac{T_e s + 1}{T_e s / R},$$
(9)

где T_t — постоянная времени, контура тока. Дальнейшая настройка системы производится на технический оптимум $W_{ol}(s) = 1/(2T_{\mu}s(T_{\mu}s+1))$ аналогично контуру тока

$$W_{wr}(s) = \frac{W_{ol}(s)}{W_{sys}(s)} = \frac{(T_t s + 1)J_s s}{2T_u s (T_u s + 1)\psi'},$$
(10)

где $T_{\mu} = T_t$ — постоянная времени контура скорости. Последней компонентой СУ является контур положения, который настроен на биноминальный оптимум $W_{ol}(s) = 1/(3T_{\mu l}s(T_{\mu l}s+1))$, что дает следующее выражение для регулятора угла поворота $W_{or}(s)$

$$W_{ar}(s) = \frac{W_{ol}(s)}{W_{sys}(s)} = \frac{(2T_{\mu}s+1)s}{3T_{\mu_{l}}s(T_{\mu_{l}}s+1)},$$
(11)

где $T_{\mu} = 2T_{\mu}$ — постоянная времени контура положения. Подобный подход позволяет управлять полным вектором состояния (ток, угловая скорость, угол поворота) при условии, что они измеряемы. Далее проведено моделирование работы СУ для выполнения задачи слежения за гармоническим сигналом с разными значениями частоты. Как видно из рисунка 7, возникшая ошибка достаточно мала, что говорит о приемлемом качестве синтезированной СУ.

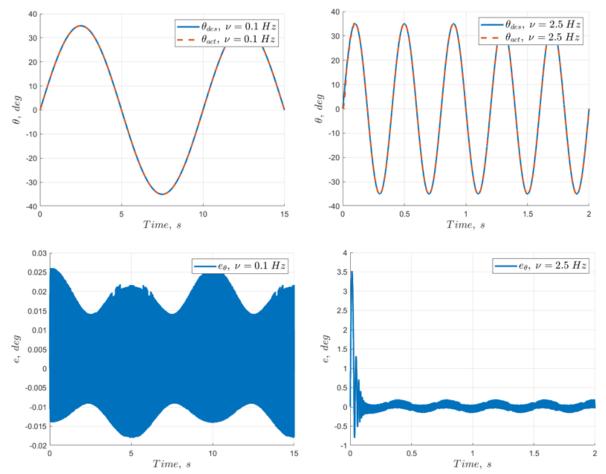


Рис. 7. Графики переходных процессов $\theta(t), e(t)$ при A=35 град, V=0.1 и 2.5 Гц для сигнала вида $\theta=A\sin(\omega t+\phi)$

Спроектированный привод в совокупности с синтезированной системой управления может успешно эксплуатироваться на реализованном прототипе робота. Однако рассмотренное строение системы гидроизоляции не гарантирует отсутствия протечек на больших глубинах. Для нивелирования данного недостатка требуется замена коллекторного двигателя на бесколлекторный с последующим улучшением системы гидроизоляции. В качестве возможного улучшения возможен отказ от планетарного редуктора в сторону магнитного редуктора.

Список использованных источников

1. Kruusmaa M. et al. Salmon behavioural response to robots in an aquaculture sea cage // Royal Society open science. – 2020. – T. 7. – №. 3. – C. 191220.

- 2. Li Q. et al. Numerical modelling and experimental testing of the hydrodynamic characteristics for an open-frame remotely operated vehicle // Journal of Marine Science and Engineering. 2020. T. 8. № 9. C. 688.
- 3. Wu B. et al. Hydrodynamic performance of an unconstrained flapping swimmer with flexible fin: A numerical study // Physics of Fluids. 2022. T. 34. № 1. DOI: 10.1063/5.0077312.
- 4. Анучин А.С. Системы управления электроприводов // М.: издательский дом МЭИ. 2015. 373 с.

УДК 621.311.24

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНУСА

Сорокина А.А.¹ (студент) Научный руководитель – к.т.н. Лукин $A.E.^{1}$

1 – Университет ИТМО

e-mail: 265957@niuitmo.ru

В работе рассмотрен потенциал использования аддитивных технологий при проектировании экспериментальной ветроэнергоустановки, работающий на эффекте Магнуса. Сложная форма лопастей, которая необходима для достижения большего коэффициента использования энергии ветра, плохо подходит для традиционных методов изготовления.

Ключевые слова

Аддитивные технологии, аддитивное производство, эффект Магнуса, оптимизация формы лопастей, ветроэнергоустановка.

Эффект Магнуса — это возникновение подъемной силы при обтекании сферического или цилиндрического вращающегося тела потоком газа или жидкости. При этом сила, которая образуется и действует на тело, оказывается перпендикулярной направлению потока (рис. 1).

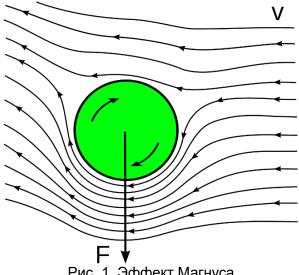


Рис. 1. Эффект Магнуса

Использование этого эффекта — это один из возможных подходов к проектированию ветроэнергоустановок (ВЭУ), способных работать на малых скоростях ветра. В таком случае, вместо классических лопастей используются вращающиеся цилиндры. Множество исследований было проведено на тему оптимальной формы цилиндров для применения на ВЭУ, работающих на эффекте Магнуса. Согласно, например, результатам команд Sun [1] и Takayama и Aoki [2], геометрия лопастей значительно влияет на коэффициент использования энергии ветра (1) установки, и стандартные гладкие цилиндры — это не самая оптимальная возможная форма.

$$Cp = \frac{P}{P_0},\tag{1}$$

где P – получаемая механическая мощность, P_0 – мощность ветряного потока.

На сегодняшний день в экспериментальной ветроэнергоустановке на эффекте Магнуса (ВЭМ) Университета ИТМО, показанной на рисунке 2, в качестве лопастей используются трубы из ПВХ [3].

Дальнейшая модернизация прототипа требует отказаться от стандартных изделий и изготовить лопасти более сложной формы, для этого предлагается использовать аддитивные технологии. Обоснование такого подхода приводится ниже.

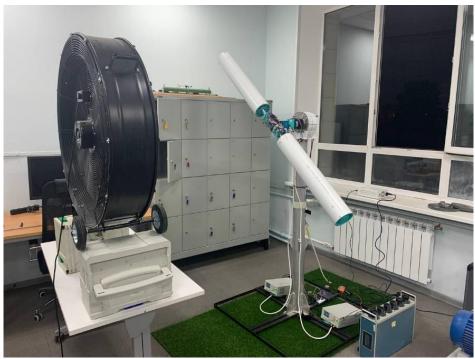


Рис. 2. Экспериментальная установка ВЭМ в Университете ИТМО

Аддитивное производство, также известное как 3D-печать, — это революционный производственный процесс, в ходе которого объекты создаются слой за слоем на основе цифровых моделей. В отличие от традиционных субтрактивных методов производства, которые предполагают вырезание или придание формы материалу из большого куска, аддитивное производство добавляет материал поэтапно, создавая трехмерные объекты с высокой точностью и сложностью.

Ключевыми преимуществами аддитивного производства являются следующие аспекты:

- технологии 3D-печати предоставляют конструкторам свободу проектирования. Сложные конструкции, внутренние элементы и индивидуальные компоненты могут быть легко включены в проект без существенного увеличения сложности производства. Это особенно ценно в отраслях, где важны легкие и оптимизированные конструкции в частности для ветроэнергетики;
- возможно быстрое прототипирование. Аддитивное производство обеспечивает быстрое создание прототипов, позволяя дизайнерам и инженерам быстро повторять и тестировать новые концепции. Это ускоряет цикл разработки продукта, сокращает время выхода на рынок и обеспечивает экономически эффективный способ доработки прототипа;
- аддитивные технологии позволяют сделать процесс производства более "зеленым", путем сокращения отходов. Традиционное производство часто предполагает "вычитание" материала из более крупного куска, что приводит к значительным отходам. Аддитивное производство по своей сути более эффективно, поскольку оно использует только материал, необходимый для конечного продукта, минимизируя отходы и способствуя устойчивому развитию.

Все это важно, в частности, для производства ВЭУ, особенно непосредственно в ходе проектирования.

В настоящее время аддитивные технологии все чаще используются в производстве в различных областях. Появляются стандарты, которые позволяют сертифицировать произведенные с помощью АП детали также, как и детали, произведенные традиционными методами – только за последние 5 лет утверждено более тридцати ГОСТ [4]. В ветроэнергетике АП могут применяться косвенно и напрямую.

Косвенное использование аддитивных технологий подразумевает изготовление оснастки методом 3D-печати. В качестве примера на рисунке 3 [5] приведена форма для литья лопасти, изготовленная на крупногабаритном 3D-принтере. Традиционный процесс изготовления прессформ для лопастей состоит из изготовления мастер-модели, ЧПУ обработки, формовки, промежуточного и финального контроля. Это может занимать до 16 месяцев. Печать же позволяет ускорить процесс до нескольких недель.



Рис. 3. Форма для изготовления лопасти ВЭУ

Под прямым использованием АП понимается печать непосредственно компонентов ВЭУ. Например, на рисунке 4 [6] показана напечатанная на FDM принтере лопасть. В статье рассматривается быстрое прототипирование различных форм лопастей для малой ВЭУ. Для изготовления каждой новой версии требовалось не более семи дней.



Рис. 4. Печатная лопасть для прототипирования

Так, методы аддитивного производства успешно применяются в рамках научно-исследовательских работ о ветроэнергоустановках, а также непосредственно в производстве.

Для существующей в Университете ИТМО экспериментальной установки ветроэнергоустановки, работающей на эффекте Магнуса, изготовление прототипов лопастей с помощью 3D печати представляется оптимальным в сравнении с изготовлением методом литья или токарной и фрезерной обработки. Это позволит перейти от моделирования к эксперименту быстрее и с меньшими финансовыми затратами.

Список использованных источников

- 1. Sun X. et al. A three-dimensional numerical study of the Magnus wind turbine with different blade shapes // Journal of Renewable and Sustainable Energy. − 2012. − T. 4. − №. 6. DOI: 10.1063/1.4771885.
- 2. Takayama S., Aoki K. Flow characteristics around a rotating grooved circular cylinder with grooved of different depths. 2005. DOI: 10.1007/BF03181548.
- 3. Лукин А.Е. Исследование и разработка системы управления ветроэнергетической установкой на эффекте Магнуса: диссертация /Университет ИТМО. 2022.
- 4. Утвержденные стандарты. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://viam.ru/uproject (дата обращения: 18.03.2024).
- 5. Post B.K. et al. Big area additive manufacturing application in wind turbine molds. 2017. Pp. 2430–2446.
- 6. Poole S., Phillips R. Rapid prototyping of small wind turbine blades using additive manufacturing // 2015 pattern recognition association of South Africa and robotics and mechatronics international conference (PRASA-RobMech). IEEE, 2015. Pp. 189–194.

УДК 621.311; 621.316

ТЕХНОЛОГИЯ VEHICLE-TO-GRID (V2G) ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ: СОВРЕМЕННЫЙ ОБЗОР

Шишков К.О.¹ (аспирант) Научный руководитель – доцент, к.т.н. Лукичев Д.В.¹

1 – Университет ИТМО

Текст рассматривает перспективы применения интеллектуальных систем управления в современном мире, с фокусом на концепции Vehicle-to-Grid (V2G). Работа выделяет преимущества V2G, такие как повышение эффективности энергопотребления, улучшение стабильности энергетической сети и дополнительные доходы для владельцев электромобилей. В основной части представлена идея использования электромобилей в качестве активных участников энергетической сети, их способность обмениваться энергией с инфраструктурой в зависимости от потребности. Анализируются достоинства и недостатки технологии, включая вызовы в виде распространения электромобилей и необходимость стандартов. Выводы подчеркивают значимость V2G для создания устойчивой и гибкой энергетической системы, способствуя переходу к чистой и устойчивой энергетике.

Ключевые слова

Vehicle-to-Grid (V2G), интеллектуальные системы управления, устойчивая энергетика, долговечность аккумулятора электромобиля, эконмическая оценка, электромобиль, парковка.

В современном мире существуют перспективные области, где успешное применение интеллектуальных систем управления может привести к значительным улучшениям. Одним из таких направлений является концепция Vehicle-to-Grid. Vehicle-to-Grid (V2G) — это технология, которая позволяет электрическим транспортным средствам взаимодействовать с электрической сетью, выступая не только как потребители электроэнергии, но и как источники её обратной передачи [1].

Центральный аспект концепции Vehicle-to-Grid заключается в использовании аккумуляторов электрических транспортных средств в качестве временных носителей энергии с целью обеспечения гибкости в управлении электроэнергией. В периоды пикового потребления владельцы электромобилей имеют возможность интегрировать свои транспортные средства в энергетическую сеть, передавая избыточную энергию обратно в инфраструктуру [1]. В периоды низкого энергопотребления транспортные средства, соответственно, имеют возможность проводить зарядку своих аккумуляторов. Схема использования технологии V2G представлена на рисунке 1.

Преимущества технологии Vehicle-to-Grid включают повышение эффективности использования электроэнергии, снижение нагрузки на электросеть в пиковые часы и обеспечение дополнительных доходов владельцам электромобилей. Тем не менее, в настоящее время технология Vehicle-to-Grid находится на стадии разработки и внедрения, что подчеркивает актуальность дополнительных исследований и внимания к безопасности и разработке стандартов [2].

Таким образом, наряду с преимуществами, технология Vehicle-to-Grid также сталкивается с определенными вызовами и ограничениями. К примеру, для её успешной реализации необходимо разработать стандарты, обеспечивающие совместимость различных моделей электромобилей и электрических сетей. Важным аспектом является также обеспечение безопасности передачи энергии между транспортным средством и сетью, с целью предотвращения потенциальных проблем.

В реализации технологии Vehicle-to-Grid имеет существенное значение не только взаимодействие с транспортными средствами, но и взаимосвязь с сетевой инфраструктурой. Применение смарт-сетей и передовых технологий управления энергией предоставляет значительные возможности для улучшения эффективности и надежности данного процесса [3].

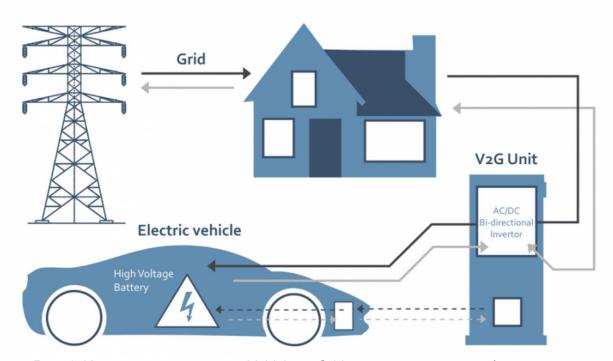


Рис. 1. Интеграция технологии Vehicle-to-Grid в энергетическую инфраструктуру

Одним из ключевых направлений развития технологии V2G является использование этих систем для предоставления различных услуг сети, включая регулирование напряжения, поддержание частоты и обеспечение резерва мощности [2]. Этот подход способствует формированию более гибкой и устойчивой энергетической системы, что становится особенно актуальным в условиях расширения доли возобновляемых источников энергии.

І. Экономическая оценка

Экономический аспект данного вопроса предполагает анализ с двух сторон: во-первых, с учетом готовности владельцев электромобилей участвовать в инициативе Vehicle-to-Grid, оценивая финансовые выгоды и затраты на ее поддержание; во-вторых, с учетом экономической целесообразности использования батарей электромобилей в регулировании параметров энергетической сети, учитывая их стоимость и срок службы.

Первый аспект требует анализа мотивации владельцев электромобилей для участия в V2G, выявления факторов финансовой привлекательности и учета затрат, связанных с активным участием в инициативе [1].

Второй аспект предполагает оценку экономической эффективности использования батарей электромобилей в качестве ресурса для регулирования энергетической сети. Эта оценка включает в себя анализ стоимости батарей, их технические характеристики, и срок службы, с учетом того, как эти параметры взаимодействуют с требованиями и потребностями энергетической инфраструктуры. На рисунке 2 представлены результаты опроса, проведённого среди владельцев электромобилей в Канаде.

Из полученных данных вытекают следующие выводы:

- под воздействием финансовых стимулов 96% автовладельцев выражают готовность участвовать в V2G концепции;
- три четверти респондентов предпочитают получать финансовую компенсацию в зависимости от ситуации, а не заключать фиксированный контракт;
- половина респондентов согласна на финансовую компенсацию в пределах 750 долларов в гол

II. Долговечность батареи электротранспорта в контексте технологии V2G

В исследовании [4], посвященном стратегии V2G для регулирования частоты основываясь на экономической оценке с учетом долговечности батареи, была проведена симуляция V2G. В процессе моделирования регулярно сменялись этапы приема и отдачи электроэнергии, при этом

максимальная мощность такого цикла не превышала 4 кВт, что отображено на рисунке 3, а. В результате активного участия электромобиля в V2G системе State of Charge (SOC), т. е. уровень заряда аккумулятора, может поддерживаться на уровне 90%, как показано на рисунке 3, б. Тем не менее, согласно выявленным данным, срок службы батареи электромобиля в таком режиме работы оценивается приблизительно в 2 года [4]. В сравнении утверждается, что средний срок службы батареи в отсутствие V2G системы колеблется от 8 до 25 лет. Заметно, что деградация батареи при участии в V2G процессах происходит существенно быстрее, что представляет собой значительную экономическую проблему в контексте стратегии V2G.

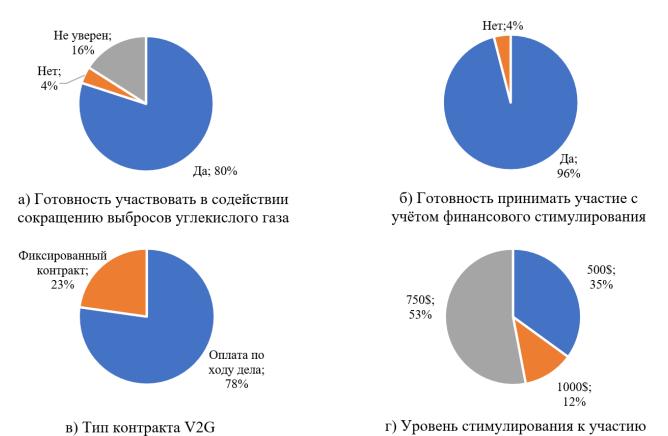


Рис. 2. Результаты опроса владельцев электромобилей на предмет участия в программах V2G

III. Парковочные площадки для электромобилей

Вместо традиционного подхода к размещению зарядных станций, активно рассматривается альтернативная концепция, основанная на использовании парковочных площадок для электромобилей [1]. Концепт такой парковочной площадки представлен на рисунке 4. Данная концепция не только предоставляет владельцам электромобилей удобство зарядки в течение периода стоянки, но также оптимизирует использование пространства. Парковочные площадки, оснащенные зарядными устройствами, могут стать центрами, способствующими развитию электромобильной инфраструктуры [5]. Этот подход активно способствует интеграции электромобилей с системой Vehicle-to-Grid [6]. Парковки, как домашние, так и офисные, позволят электромобилю быть подключенным к сети в течение приблизительно 20 часов [5]. Таким образом, парковочные площадки могут быть адаптированы и для интеграции с V2G, и для использования без данной технологии, обеспечивая поддержку всей отрасли электромобилей, а не только участников системы V2G.

Одним из основных опасений владельцев электромобилей является быстрая деградация батарей. Однако, благодаря тщательному управлению процессом зарядки и разрядки в рамках V2G, можно снизить этот риск. Системы управления энергией, а также технологии прогнозирования и оптимизации позволяют минимизировать воздействие на батареи, что в итоге продлевает их срок службы и снижает затраты на обслуживание.

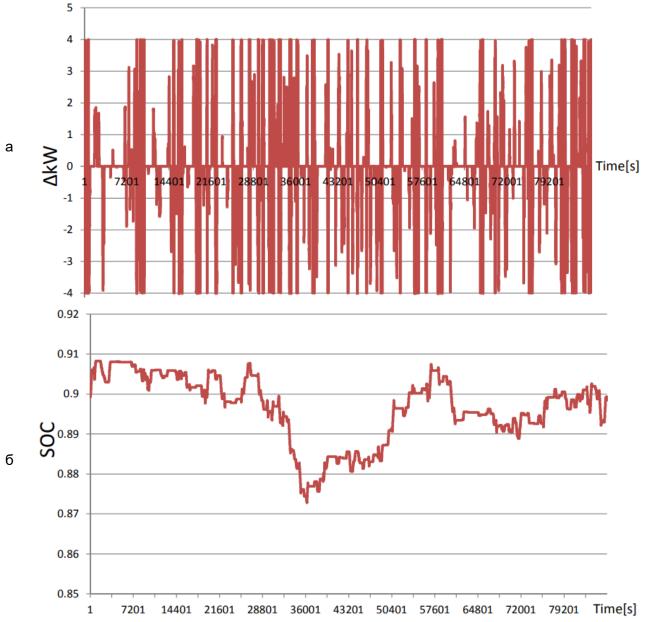


Рис. 3. Результаты моделирования показателей батареи электромобиля во время активного участия в системе с V2G (а) Изменение мощности (б) Изменение State Of Charge (SoC)

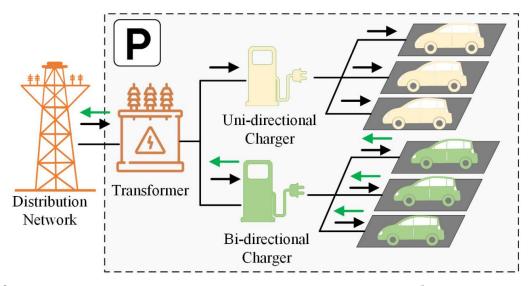


Рис. 4. Схематичное представление парковочных мест для электромобилей с интеграцией V2G

Несомненно, увеличение количества владельцев электромобилей, участвующих в V2G, представляет собой перспективу для устойчивого развития этой технологии. С развитием стандартов, созданием привлекательных экономических стимулов и обеспечением надежности систем V2G можно ожидать активного роста числа участников. Это не только создаст дополнительные источники дохода для владельцев электромобилей, но и способствует более устойчивой и эффективной энергетической системе.

В среднем ежедневно автовладельцы, управляющие электромобилями, затрачивают от 2,5 до 4 часов на активность за рулём. Согласно теоретическим предположениям, оставшиеся 20 часов транспортные средства могут быть включены в энергосистему. Для реализации данной концепции предлагается акцентировать внимание на создании парковочных пространств с интегрированными возможностями V2G зарядки для электромобилей, в отличие от установки зарядных станций с ограниченным числом доступных мест.

Список использованных источников

- 1. Abdullah Al-obaidi, Hany E. Z. Farag. Optimal Design of V2G Incentives and V2G-Capable Electric Vehicles Parking Lots Considering Cost-Benefit Financial Analysis and User Participation. // IEEE Transactions on Sustainable Energy. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10226205 (дата обращения: 20.12.2023).
- 2. Shota Yumiki, Yoshihiko Susuki, Yuta Oshikubo, Yutaka Ota, Ryo Masegi, Akihiko awashima, Atsushi Ishigame, Shinkichi Inagaki, Tatsuya Suzuki. Autonomous vehicle-to-grid design for provision of frequency control ancillary service and distribution voltage regulation. // Sustainable Energy, Grids and Networks. 2022. Vol. 30. DOI: 10.1016/j.segan.2022.100664.
- 3. Awais Hashmi, Muhammad Talha Gul. Integrating E-Vehicle into the Power System by the Execution of Vehicle-to-Grid (V2G) Terminology A Review. // International Conference on Engineering and Emerging Technologies (ICEET). [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/8338642 (дата обращения: 20.12.2023).
- 4. Shigeru Tamura, Takuro Kikuchi. V2G Strategy for Frequency Regulation Based on Economic Evaluation Considering EV Battery Longevity. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/8612431 (дата обращения: 20.12.2023).
- 5. Han Xiao, Yuan Huimei, Wei Chen, Li Hongjun. A Survey of Influence of Electrics Vehicle Charging on Power Grid. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/6931143 (дата обращения: 20.12.2023).
- 6. Huangjie Gong, Rosemary E. Alden, Dan M. Ionel. Stochastic Battery SOC Model of EV Community for V2G Operations Using CTA-2045 Standards. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/9813889 (дата обращения: 20.12.2023).

УДК 621.3.07

ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА: МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НАМАГНИЧИВАНИЯ

Яременко А.М.¹ (аспирант) Научный руководитель – к.т.н., доцент Демидова Г.Л.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: yaremenko.and@yandex.ru

В работе рассмотрены различные методы определения поверхности намагничивания для вентильно — индукторного двигателя. Проведен анализ и дана краткая характеристика каждого из методов. Выбран метод для дальнейшего проведения эксперимента. Особое внимание уделено проведению эксперимента и отражению полученных результатов. Методика проведения опыта может быть актуальна для синтеза поверхностей намагничивания для разных двигателей.

Ключевые слова

Вентильно-индукторный двигатель, поверхность намагничивания, идентификация, онлайн методы, офлайн методы, нелинейность.

Вентильно-индукторная электрическая машина — электромеханическая машина, преобразующая электрическую энергию в механическую энергию вращения вала (электропривод) или механическую энергию, подведенную извне, в электрическую (генератор). Последние годы широкое обсуждение в научном сообществе вызвал вентильно — индукторный двигатель (ВИД), как наиболее перспективный для применения в качестве тягового двигателя. В иностранной литературе ВИД часто обозначают как Switched Reluctance Motor (SRM). Принцип работы данного двигателя основан на изменении индуктивности обмоток, располагающихся на зубцах статора при передвижении зубчатого ротора. При этом ротор всегда стремится сориентироваться во внешнем магнитном поле таким образом, чтобы магнитный поток, проходящий через ротор, принимал максимальное значение [1].

Электропривод на основе ВИД представляет из себя сложную электромеханическую систему. В состав такой системы как правило входит преобразователь частоты, вентильно – индукторный двигатель, система управления и датчик положения ротора [2].

Представленный двигатель имеет ряд преимуществ, благодаря которым его рассматривают в первую очередь для применений в электротранспорте. Среди основных достоинств выделяют: отказоустойчивость, простота конструкции, стоимость, отсутствие магнитов, высокая скорость работы. Однако, как и другие двигатели, ВИД обладает рядом недостатков. Среди недостатков упоминают: сложность управления, пульсации момента. Говоря о надежности привода с ВИД, некоторые исследователи отмечают, что наличие электронного преобразователя уменьшает надежность привода в целом, так как двигатель не сможет работать с неисправным оборудованием [2]. Кроме того, пульсации момента вызывают шум и вибрации при работе двигателя.

Для управления вентильно — индукторным двигателем необходимо управлять токами его фаз в соответствии с положением его ротора. Положение ротора можно определить с помощью датчик положения ротора, однако использование датчика не всегда оправдано. В таких случаях для ВИД существует возможность управлять двигателем косвенно.

Несмотря на простоту своей конструкции, данный тип двигателя характеризуется значительной нелинейностью, что осложняет процесс моделирования и управления. Анализ исследований показал, что для моделирования ВИД используются две характеристики. Первый метод основан на индуктивной характеристике модели. Второй метод использует потокосцепление как основную характеристику. На рисунке 1 представлена классификация методов моделирования характеристики ВИД.



Рис. 1. Подходы к моделированию ВИД

Для моделирования системы управления ВИД была выбрана нелинейная характеристика потокосцепления, как наиболее близкая к реальному объекту. Зависимость потокосцепления от угла поворота ротора и тока называют картой или поверхностью намагничивания [3].

Следующей задачей решается непосредственно выбор методики получения этой характеристики. Методы получения разделяют на две категории: онлайн и офлайн. Оффлайн методы используют специальную оснастку и позволяют определить карту намагничивания на полном обороте ротора и во всем диапазоне изменения тока. Онлайн методы же не требуют специальной оснастки и позволяют проводить снятие характеристик без отключения самого двигателя, однако такие методы предоставляют данные только о рабочих характеристиках. Несмотря на некоторую ограниченность применения онлайн методов, их количество постоянно растет. Наиболее известными онлайн методами являются методы, основанные на нейронных сетях, использующие нечеткую логику, онлайн реконструкция (применение базы данных) и метод черного ящика.

Методы, основанные на нейронных сетях и нечеткой логике, применяются в бессенсорных системах для оценки положения ротора, а также для аппроксимации карты намагничивания. В отличии от нечеткой логики нейронные сети не требуют наличия лингвистических правил и эксперта, который их сформулирует. Однако существуют работы, показывающие высокую степень устойчивость моделей с нечеткой логикой к шумам и ошибкам [4].

Метод онлайн-реконструкции не является популярным способом определения поверхности намагничивания, однако он представляет интересный подход к расчету характеристик, которые используются при построении карты намагничивания. Данный метод использует базу данных и язык SQL, с помощью которого производится автоматический расчет энергетической и механической характеристик. Отличительной чертой данного метода является его использование в качестве основы для синтеза форм кривых тока с целью снижения пульсаций момента [5].

Метод черного ящика ценен для систем, в которых внутренние процессы очень сложны и требуют много времени для оценки. Подробно метод описан в [6]. Однако в приведенной работе описывается простейшая система с одним входом и одним выходом в виде передаточной функции.

В противовес онлайн метода существующие оффлайн методы обладают рядом отличительных особенностей. Среди оффлайн методов выделяют два основных: метод расчета карты по известной моментной характеристике двигателя и построение карты намагничивания с искусственно заторможенным ротором [7, 8]. Первый метод требует наличие фиксирующей оснастки и учитывает конструктивных нелинейностей только при полном обороте для каждой из фаз. Второй метод требует устройство для блокировки ротора. Оба метода не подходят, если двигатель уже введен в эксплуатацию, однако в случае со вторым методом не требуется управлением ВИД во время измерений.

Учитывая приведенный выше обзор методик для измерения параметров ВИД был выбран оффлайн метод построение карты намагничивания с искусственно заторможенным ротором. Данный метод позволит получить характеристику максимально приближенную к реальному объекту, при этом нет необходимости в управлении самим двигателем. Принцип работы заключается в механической блокировке ротора в любом желаемом положении, подаче

напряжения на проверяемую обмотку и измерения фазного тока и напряжения. Положение ротора можно определять как по градуированной шкале, так и с помощью датчика положения ротора. Первым опытом, как правило, снимаются характеристики в согласованном положении – положении, в котором зубцы фазы и полюса ротора находятся строго друг напротив друга.

В качестве испытуемого двигателя был выбран ВИД с характеристиками, приведенным в таблице.

Характеристики испытуемого двигателя

Таблица

Параметр	ВИД 7.5
Число фаз	3
Число зубцов статора/ротора	6/4
Номинальная мощность, кВт	7.5
Номинальное напряжение в звене постоянного тока, В	540
Номинальный ток, А	19.1
Частота вращения, об/мин	3000

Эксперимент проводился по следующему алгоритму:

- 1) подключение измерительного и питающего оборудования;
- 2) подача скачкообразного напряжения;
- 3) фиксация значений напряжения и тока;
- 4) отклонения ротора на 6 градусов;
- 5) фиксация ротора в новом положении;
- 6) повторить с п. 2 по восемь раз в обоих направлениях от согласованного положения.

В качестве источника питания используется лабораторный автотрансформатор с установкой 540В. Для снятия характеристик тока и напряжения используется осциллограф. По полученным данным рассчитывается потокосцепление и строится поверхность намагничивания. Полученная карта представлена на рисунке 2.

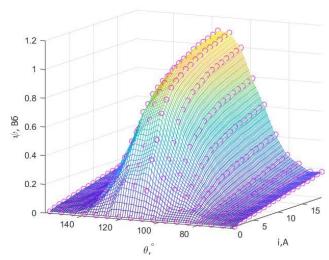


Рис. 2. Идентифицированная поверхность намагничивания

В процессе работы получились следующие выводы: для получения карты намагничивания были проведены измерения токов и напряжений в различных положениях, провести расчет потокосцепления. Измерено 17 положений. На графике хорошо видно ярко выраженную зону согласованного положения и характерную нелинейную зависимость. Полученная карта намагничивания может быть использована при моделировании управления вентильно – индукторным двигателем.

Список использованных источников

- 1. Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторный двигатель для привода механизмов собственных нужд электростанций: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. Москва.: МЭИ, 2004. 20 с.
- 2. Кузнецов В.А., Кузьмичев В.А. Вентильно-индукторные двигатели. Учебное пособие. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 70 с.
- 3. Анучин А.С. Разработка системы управления многофазного вентильно-индукторного привода с промежуточным регулируемым звеном постоянного тока: автореф. дис. на соиск. уч. степени канд. техн. наук. Москва.: МЭИ, 2004. 20 с.
- 4. Анучин А.С., Столяров Е.О., Сурнин Д.К. [и др.] Идентификация карты намагничивания вентильно-индукторного электропривода в режиме реального времени // Известия СПбГЭТУ ЛЭТИ. 2021. № 1. С. 69–75.
- 5. Mes E., Torrey D.A. An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors using Artificial Neural Networks // IEEE Transactions on Power Electronics 17. 2002. Pp. 66–75.
- 6. Aamoud A., Naitali A., Hammouch A. Online characterization of switched reluctance motors // 2016 International Conference on Electrical and Information Technologies (ICEIT), Tangiers, Morocco. 2016. Pp. 441–446.
- 7. Wahid M.R., Joelianto E., Azis N.A. System Identification of Switched Reluctance Motor (SRM) Using Black Box Method for Electric Vehicle Speed Control System // 2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT), Bali, Indonesia. 2019. Pp. 208–212.
- 8. Cossar C., Miller T.J.E. Electromagnetic testing of switched reluctance motors // Proceeding of International Conference on Electrical Machines Manchester. 1992. Pp. 470–494.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Мультимедиа-технологии, дизайн и юзабилити
Мультимедиа-технологии, дизайн и юзабилити
тультимедии технологии, дизиит и тозионлити

УДК 004.925.3

СОЗДАНИЕ РЕАЛИСТИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТРАССИРОВКИ ЛУЧЕЙ

Липаева К.С.¹ (студент), Иванчура А.В.¹ (студент), Научный руководитель – к.ф.-м.н., доцент Жданов Д.Д.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: ksenialipaeva@yandex.ru, sandraivanchura@gmail.com

В данной работе рассматривается способ создания реалистичных изображений оптически сложных трехмерных сцен методом стохастической трассировки лучей, описаны алгоритмы трассировки лучей, сглаживания нормалей и билатеральной фильтрации. С помощью библиотеки трассировки лучей Embree, имеющей API на языке программирования C++, была написана программа, позволяющая физически корректно моделировать оптические явления и формировать изображение сцены.

Ключевые слова

Стохастическая трассировка лучей, метод русской рулетки, метод Монте-Карло, моделирование освещенности, глобальное освещение.

Глобальное освещение играет важную роль в создании реалистичных изображений или анимации трехмерных сцен. Моделирование глобального освещения позволяет визуализировать результат физически корректного взаимодействия света с объектами сцены для заданных условий наблюдения. Расчет глобального освещения учитывает не только все источники света и их взаимодействие с объектами сцены, но и влияние светового взаимодействия объектов для создания общего реалистичного освещения сцены.

Методы трассировки лучей используются для моделирования глобального освещения. Они позволяют отслеживать пути световых лучей через сцену и вычислять, как лучи взаимодействуют с различными объектами сцены, корректно учитывая оптические свойства этих объектов (цвет, зеркальность, прозрачность и т. д.). Данные методы позволяют создавать физически корректное освещение в трехмерной сцене [1].

Методы трассировки используются в программах 3D моделирования, таких как Blender, Unity и Unreal Engine, для создания высококачественных изображений. Они также находят применение для создания виртуальной реальности, где реалистичные визуальные эффекты играют ключевую роль в погружении пользователя в виртуальный мир.

Целью данной работы является разработка программы, позволяющей физически корректно моделировать оптические явления методом стохастической трассировки лучей для создания реалистичны изображений.

Алгоритм

В ходе создания приложения была использована библиотека трассировки лучей «Embree», имеющая API и открытый исходный код на языке программирования C++, которые предоставляют набор высокопроизводительных функций для работы с геометрией сцены. Основные возможности библиотеки включают в себя:

- 1. Алгоритмы быстрого создания и обработки ограничивающих объемов и сеток, такие как Sweep-and-Prune, Spatial-Sorting и другие.
- 2. Алгоритм анализа данных пространственных объектов, который позволяет быстро и точно определить, имеют ли два объекта столкновения.
- 3. Поддержка различных форматов данных: библиотека поддерживает широкий спектр форматов файлов, таких как.OBJ,.3DS,.PLY,.OFF и другие [2].

Далее приведено описание алгоритма, используемого в программе.

Пусть имеется трехмерная сцена, состоящая из геометрических объектов, включая источники света, и камеры. Камера имеет вид прямоугольного экрана с регулярной сеткой (двумерной матрицей пикселей) и точкой наблюдения.

Алгоритм трассировки лучей основан на методе статистического моделирования Монте-Карло, который с помощью многократных случайных блужданий луча в сцене позволяет оценить интеграл яркости в направлениях наблюдения [3].

Каждая итерация описывает случайную трассу луча в сцене с учетом оптических свойств ее объектов. Трассировка луча продолжается до тех пор, пока не было получено событие смерти луча, которое обеспечивается методом «русской рулетки».

Далее будет описана одна итерация разработанного алгоритма:

- 1. Сначала при помощи генератора случайных чисел выбирается один пиксель на экране. Так как экран имеет размер и разрешение, то каждый пиксель экрана имеет конечный размер, что позволяет достаточно просто выбрать пиксель. В выбранном пикселе так же с помощью генератора случайных чисел выбирается случайная точка. Выбирая не конкретную, а случайную точку в пределах этого пикселя можно добиться антиальясинга итогового изображения. Через выбранную точку в сцену пускается луч, начало которого находится в точке наблюдения.
- 2. С помощью библиотеки «Еmbree» осуществляется поиск точки пересечения луча с геометрическими объектами сцены, открывается доступ к параметрам найденного объекта сцены, а именно индекс объекта, нормаль к поверхности объекта, расстояние до точки пересечения и барицентрические координаты точки пересечения относительно полигона, в который попал луч.
- 3. Если произошло попадание луча в источник света, то возвращается яркость этого источника.
- 4. Далее с помощью метода выборки по значимости выбирается источник света в сцене (в качестве «значимости» берется значение потока источника света), а затем случайным образом на источнике света выбирается точка, освещенность от которой будет вычислена.
- 5. С помощью библиотеки «Embree» анализируется теневой луч, который позволяет определить, находится ли какой-нибудь геометрический объект на отрезке, соединяющей выбранную в п.4 точку В (рисунок) на источнике света с найденной в п.2 точкой А (рис. 1) на геометрическом объекте. В случае затенения, т. е. наличия объекта на трассе теневого луча освещенность в точке В будет равна 0, т. е. в этой точке должна быть тень.

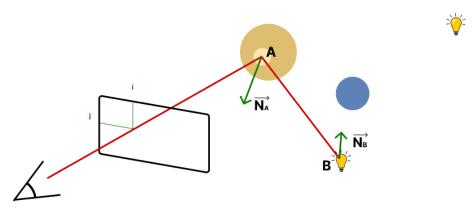


Рисунок. Алгоритм трассировки луча

6. В случае отсутствия тени освещенность будет вычислена по следующей формуле:

$$\vec{E} = \vec{L} \cdot S \cdot \frac{\cos(\alpha) \cdot \cos(\beta)}{r^2},\tag{1}$$

где \vec{L} — яркость источника света, S — площадь источника света, α — угол между лучом и нормальюк поверхности объекта, β — угол между лучом и нормалью к поверхности источника света, r — расстояние между точками на объекте и источнике света.

7. Получаемый вектор яркости будет равен покоординатному произведению вектора освещенности на вектор цвета точки на объекте, деленный на π ;

$$\vec{L} = \vec{E} \cdot \overline{BRDF} \cdot \frac{1}{\pi},\tag{2}$$

где \vec{E} — вектор освещенности, полученный в п.6, \overline{BRDF} — вектор оптических свойств поверхности, в данной модели используется приближение Ламберта.

- 8. Затем случайным образом выбирается одно из следующих событий на объекте: зеркальное отражение, диффузное отражение, преломление, диффузное преломление и т. д. В зависимости от вида выбранного события по соответствующему закону можно получить направление луча. Например, в случае зеркального отражения, луч отражения будет находиться в той же плоскости, что и луч падения, а также угол между лучом отражения и нормалью к поверхности будет равен углу между лучом падения и нормалью.
- 9. Событие смерти луча, то есть конца итерации, обеспечивает метод «русской рулетки». Метод «русской рулетки» добавляет событие поглощения луча, позволяя сохранить энергию рассеянных лучей.
- 10. Далее с новым направлением луча и его начальной точки алгоритм продолжает работу с пункта 2 и аналогично пунктам 5–7 считается яркость, которая будет суммироваться с начальной яркостью.
- 11. В пиксель записывается сумма всех получившихся в ходе данной итерации трассировки луча яркостей.

Метод сглаживания нормалей

Для сокращения объемов памяти и времени на вычисления в трехмерных сценах часто используются low-poly модели, то есть трехмерные модели, состоящие из небольшого количества полигонов. Вследствие этого снижается качество получаемого изображения, так как изменяется внешний вид объектов сцены, которые в реальной жизни имеют гладкую поверхность.

Для решения этой проблемы используется метод сглаживания нормалей. Метод заключается в том, что при попадании луча на поверхность полигона, берется не нормаль к поверхности полигона, а взвешенная сумма нормалей в вершинах этого полигона. Коэффициентами служат барицентрические координаты точки внутри полигона. Например, в случае разбиения трехмерной модели на полигоны в виде треугольников формула, по которой будет вычисляться нормаль, будет выглядеть так:

$$\vec{N} = u\vec{A} + v\vec{B} + (1 - u - v)\vec{C},\tag{3}$$

где \vec{A} , \vec{B} , \vec{C} — нормали в вершинах треугольника, а u и v — барицентрические координаты точки в треугольнике.

Этот метод позволяет сгладить скачок яркости на границах полигона, тем самым делая поверхность визуально гладкой.

Фильтрация

Вследствие случайного характера трассировки лучей на итоговом изображение может появляться шум. Для решения этой проблемы используются различные фильтры, которые с разной степенью успеха сглаживают шум на изображении, стараясь при этом не размыть его ключевые детали, то есть сохранить исходную четкость.

Для уменьшения шума итогового изображения в разработанной программе был применен алгоритм билатеральной фильтрации [4]:

1. Создается четыре изображения: прямое видение, прямой свет, каустика и вторичное освещение. Прямое видение — это яркость, получаемая от источников света, после попадания в них. Прямой свет — это яркость объектов в сцене, полученная после первого попадания луча на объект. Каустика — яркость, имеющая события зеркального отражения или преломления на трассе «прямого» освещения. Вторичное освещение — яркость

объектов в сцене, освещенная другими объектами. Разделение света на несколько видов позволяет использовать разное ядро фильтрации для каждого из видов, поскольку каждый вид изображения имеет разный характер шума.

- 2. Для каждого изображения считается среднеквадратичное отклонение яркости σ. Это значение будет использоваться в качестве радиуса фильтрации.
- 3. Для каждого пикселя изображения высчитывается взвешенная сумма пикселей в радиусе σ от данного:

$$\vec{L}(x,y) = \frac{\sum_{i,j} (w_{i,j} * \vec{L}(x-i,y-j))}{\sum_{i,j} w_{i,j}}.$$
(4)

А вес каждого пикселя вычисляется по формуле:

$$w_{i,j} = e^{-k\frac{|\vec{L}(x-i,y-j)-\langle \vec{L}\rangle(x-i,y-j)|}{\langle \vec{L}\rangle(x-i,y-j)}} e^{-\sigma} e^{\frac{-((x-i)^2+(y-j)^2)}{2r^2}}.$$
 (5)

Чем дальше пиксель находится от исходного пикселя, тем меньше его вес.

Дополнительно храня информацию о том, яркость какого объекта на сцене записана в пиксель и каково значение вектора нормали в соответствующей точке объекта, можно сравнивать эти данные с данными, относящимися к данному пикселю и, в случае различий, например, если пиксель принадлежит другому объекту или другой стороне граненой фигуры, присваивать весу пикселя нулевое значение.

4. Выполнив фильтрацию для каждого из четырех изображений, можно получить итоговое изображение путем их сложения.

В данной работе был рассмотрен алгоритм создания реалистичного изображения оптически сложных трехмерных сцен методом стохастической трассировки лучей, а также алгоритмы сглаживания нормалей и билатеральной фильтрации итогового изображения в пространстве реальных яркостей. В дальнейшей работе над проектом планируется рассмотрение метода освещения по Фонгу и поиск способов оптимизации алгоритма.

Список использованных источников

- 1. Жданов Д.Д., Гарбуль А.А., Потемин И.С., Валиев И., Соколов В.Г. Методы стохастической трассировки лучей в задачах построения изображений, формируемых реальными оптическими системами // ГрафиКон'2016: труды 26-й Международной конференции "GraphiCin 2016" АНО научного общества "Графикон" и Нижегородского государственного архитектурно-строительного университета. 2016. С. 29–33.
- 2. Документация библиотеки Embree. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.embree.org/index.html (дата обращения: 20.04.2023).
- 3. Жданов Д.Д., Потемин И.С., Жданов А.Д. Методы расчета глобальной освещенности: учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2023. 169 с.
- 4. Жданов Д.Д., Волобой А.Г. Метод подавления стохастического шума изображения, сгенерированного Монте-Карло трассировкой лучей, сохраняющий мелкие детали // Препринты ИПМ им. М.В.Келдыша. 2018. №. 194. С. 1–15.

УДК 004.91

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОЛЛЕКЦИЙ ТЕКСТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СПЕЦИАЛИСТА

Машина Е.А.¹ (студент), Балакшин П.В.¹ Научный руководитель – к.т.н. Балакшин П.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: mashina.katherina@niuitmo.ru

В работе рассматриваются вопросы, связанные с использованием методов семантического анализа специализированных коллекций текстов для определения профессиональных компетенций специалиста при его рекрутинге, а также обсуждаются возможности и шаги по интеграции таких решений в информационную среду предприятия для создания семантически обоснованной системы поддержки принятия решений по анализу агрегатированных из различных специализированных коллекций текстов данных о кандидатах на конкретную вакансию с целью выяснения их профессионального потенциала.

Ключевые слова

Рекрутмент, информационная асимметрия, компетенции, семантический анализ, специализированные коллекции текстов.

В современных условиях перехода к экономическому укладу Индустрии 4.0, характеризующегося повсеместным проникновением во все сферы человеческой деятельности роботизированных решений, основанных на использовании методов искусственного интеллекта, еще более возрастает роль квалифицированного труда специалистов. При этом создание корпоративных процедур рекрутинга необходимых предприятию сотрудников является одним из основных путей повышения эффективности современного бизнеса [1]. В этой связи выявление набора персональных компетенций каждого работника становится сегодня наиболее существенной процедурой, предшествующей принятию решения о выборе конкретного специалиста для замещения открывающейся вакансии [2], а деятельность кадровых служб предприятия становятся одними из ключевых подразделений любой компании [3].

Однако следует учитывать, что увеличение финансовых и временных расходов на рекрутинг необходимых профессионалов не всегда позволяет компаниям из сотен кандидатов на хорошо оплачиваемое рабочее место подобрать специалиста, который обладает необходимыми профессиональными навыками в области разработки [4]. Поэтому перманентные сложности с рекрутингом высококвалифицированных работников являются одними из основных проблем успешного развития большого числа современных предприятий [5].

При этом современные средства темпорального мониторинга информационного окружения позволяют с высокой производительностью находить и отслеживать разнообразные сведения о людях [6]. Но получаемые таким путем обширные информационные массивы создают для hrотделов компаний предпосылки «информационного взрыва» [7], приводящего к тому, что собранную информацию оказывается трудно адекватно обрабатывать и объективно оценивать. Это приводит к тому, что при осуществлении процедур рекрутмента используется лишь около 5% доступной информации о кандидатах, претендующих на конкретную вакансию [8].

В связи с этим представляется целесообразным создание специализированных средств для поддержки принятия решений по первичной обработке собранных информационных массивов данных о кандидатах для подготовки к персональным собеседованиям с целью выяснения их индивидуальных компетенций.

Предпосылкой создания способа формального определения индивидуальных компетенций специалиста является понимание исключительной вербальности всего объема человеческого знания и возможности фиксации этого знания в различных текстах, порождаемых специалистом ранее [9].

Предлагаемый для решения представленной задачи подход основывается на предположении о том, что и компетенции высококвалифицированного работника, претендующего на занятие вакантного места инновационной компании, и требования, диктуемые конкретным набором работ, на выполнение которых работника нанимают, могут быть описаны в виде определенных наборов (коллекций) документов, на основании сравнительного анализа которых можно сделать вывод о соответствии специалиста его будущему рабочему месту.

Таким образом, решение поставленной задачи определения конкретного набора компетенций сотрудника может быть основано на предположении о том, что и компетенции высококвалифицированного работника могут быть описаны в виде определенных наборов текстов, на основании анализа которых можно сделать вывод о конкретных компетенциях специалиста.

Это, в свою очередь, позволяет свести решение задачи оценки степени соответствия компетенций кандидата на вакансию и требований его будущего рабочего места к решению набора задач по определению степени похожести порождаемых работником текстов и коллекций документов, описывающих его будущее рабочее место. В связи с этим в качестве конкретных средств анализа коллекций документов, характеризующих компетенции работника инновационного предприятия, предполагается использовать методы анализа текстов, созданных на естественном языке (Natural Language Processing, NLP), предполагающих выделение из анализируемых текстов речевых концептов, характеризующих его содержание [10]. Основой для проведения семантического анализа документов является факт того, что естественный язык человеческого общения характерен разной и при этом достаточно строго определенной встречаемостью слов в тексте. А более частое чем обычно использование конкретных слов может свидетельствовать об их важности для конкретного текста.

Обычно для представления документов в тематическом моделировании используется векторная модель представления документа (Vector Space Model, VSM). Построение данной модели проводится следующим образом: рассматривается выборка текстов, каждый объект из которой представляется вектором, элементами которого является количество используемых слов во всей выборке.

Векторная модель текстового документа может быть представлена в виде Bag of Words (мешок слов), в которой текст рассматривается в виде некоторого неупорядоченного множества содержащихся в нем слов (для которого важно наличие слова в данном тексте, а не его конкретное место в нем).

В настоящее время создано достаточно большое число векторных представлений текстов, позволяющих на их основе различными методами определять степень похожести предварительно обработанных текстов и выделять существующие в них наиболее характерные группы семантических объектов [11, 12]. Также уже проведены работы, оценивающие степень применимости подобных подходов для решения конкретных задач снижения информационной неопределенности при оценке профессиональных компетенций специалистов инновационных отраслей. Выполненные работы позволяют считать, что основной математический аппарат, предназначенный для выделения следов профессиональных компетенций из текстов, порожденных высококвалифицированными специалистами, выбран и прошел процедуры апробации.

В этой связи основным направлением работ по созданию эффективных информационных средств поддержки процедур рекрутинга, предназначенных для преодоления информационной неопределенности, объективно обусловленной отсутствием измерителей профессионального потенциала специалистов в развивающихся областях знания, должно являться создание методов агрегатирования текстов, адекватно и репрезентативно характеризующих речевую компетенцию специалиста в конкретной области.

Поэтому в целях создания унифицированных механизмов агрегатирования текстов, порождаемых специалистами развивающихся отраслей были проведены значительные работы по структурированию текстовых источников, содержащих информацию о речевых компетенциях исследователей [13], на основании чего авторами было предложено представлять сводную коллекцию порожденных специалистом документов состоящей из четырех наборов текстов (рисунок).



Рисунок. Структура сводной коллекции тексов, характеризующей речевые компетенции специалиста

Указанное подразделение порождаемых текстов хорошо тем, что указывает не только на пути происхождения навыков, но и позволяет определить пути формирования соответствующих элементов коллекции.

Так, тексты, относящиеся к первой группе и характеризующие образовательные процедуры, достаточно просто собираются и представляются самим специалистом в виде «образовательного портфолио», содержащего отчетные материалы, созданные им за период обучения.

Тексты, порожденные работником в период его производственной деятельности, складываются из двух составляющих: из авторских текстов (статей, отчетов и т. п. документов, выпущенных под авторством работника) и которые он может самостоятельно включать в свое «профессиональное портфолио» и внешних документов, детально описывающих вклад специалиста в проекты, в которых он принимал участие. Вторая часть текстов вы путем расширенного изучения информационного пространства методами «разведки рынка труда» (LMI — labor market intelligence), осуществляемыми путем мониторинга персональных достижений кандидата на вакансию [14].

Наборы текстов, использованные работником в своей деятельности, представляют собой коллекции документов, которыми специалист активно пользуется во время своей деятельности и на которые ссылается в своих работах [15]. Включение этих документов в общую коллекцию порождаемых текстов специалиста обусловлено тем, что использование результатов работ других авторов в собственных исследованиях говорит об усвоении и активном автором указанного материала (что является свидетельством его компетенций в рассматриваемом направлении). При этом подобные материалы должны входить в итоговую коллекция текстов специалиста с некоторыми поправочными коэффициентами, учитывающими возможную редукцию «чужого знания».

Наибольшие трудности могут проявиться при создании коллекций порожденных текстов, характеризующих фоновые компетенции специалиста, являющиеся личностным осмыслением субъективных знаний об окружающем мире, представляющие собой основу языкового общения [16] и которые, в большинстве случаев, приобретаются и передаются акторами в вербальной неписьменной форме. При этом к фоновыми компетенциям относятся не только навыки, формирующие поведение человека в рамках «наивной картины мира», но и «высокоуровневые компетенции», такие как способность выполнять инновационную деятельность, склонность к самообучению и работе в малых группах.

В связи с тем, что подобные компетенции, обычно, не находят своего отражения в большей части порождаемых специалистом текстов, для их выявления создан достаточный перечень

специализированного инструментария, включающий в себя расширенное личностное тестирование, целевой сторителлинг, расширенные игровые практики. Собранные таким образом тексты могут создать коллекцию порождаемых текстов, являющиеся результатом личного освоения человеком путей достижения индивидуальных целей, и, фактически являющиеся отражением фоновых компетенций, особенно ценных при инновационных разработках.

В дальнейшем, последовательно проводя процедуры семантического анализа собранных индивидуальных коллекций текстов, порожденных соискателями рабочего места в инновационной компании, по наибольшему семантическому сходству с коллекцией текстов, описывающих рабочее место, возможно выделить наиболее подходящих кандидатов для каждого из рабочих мест.

При этом, несмотря на то, что документированные описания процессов предприятия оказываются распределены между различными информационными системами компании и в их описании используются документы, записи, модели и тому подобные структуры совершенно различных типов, основные концепты, описывающие элементы знаний описывающих каждое рабочее место, могут быть достаточно просто выделены из корпоративных документов по единой универсальной схеме, что позволяет создать коллекции текстов, характеризующих рабочие места инновационных предприятий на которые производится поиск специалистов.

Поскольку существование информационной асимметрии оказывает влияние не только на процедуры выбора конкретного специалиста для конкретного рабочего места, но и приводит к общим серьезным проблемам рынка труда инновационных предприятий в целом, фактически приводящим к возникновению риска систематического негативного отбора работников [17], создание систем анализа компетенций работников на основе семантического анализа порождаемых ими текстов, должны проводиться в рамках открытых и унифицированных процедур, позволяющих всем участникам рынка иметь единый доступ к подобной информации для повышения общей эффективности рынка труда в целом.

Причем для повышения общей эффективности возможностей систем информационной поддержки процедур рекрутинга стартапов дальнейшими шагами по развитию решений по созданию систем автоматизированной оценки соответствия работников инновационных предприятий требованиям выполняемых ими работ должны явиться:

- создание унифицированных средств семантической паспортизации рабочих мест инновационных предприятий;
- создание механизмов темпорального отслеживания потребностей инновационных разработок в компетенциях специалистов в развивающихся областях разработок;
- встраивание создаваемых процедур оценки кандидатов на рабочие места в инновационных предприятиях, основанные на сравнительном семантическом анализе порожденных специалистом текстов, в процедуры рекрутинга.

Успешное создание системы перманентного определения текущих компетенций высококвалифицированных работников инновационных отраслей, направленное на повышение обоснованности принятия управленческих решений в сфере найма трудовых ресурсов, позволит существенно повысить общую выживаемость стартапов на первых этапах их существования, обеспечить эффективное развитие подобных структур и превращение их в полноценные объекты бизнеса.

Список использованных источников

- 1. Волков А.Т., Дегтярева В.В., Устинов В.С. Особенности инновационного предпринимательства в условиях развития национальной технологической инициативы // Инновации. 2017. №. 11(229). С. 54—59.
- 2. Запорожец А.С. Инновационные предприятия и их особенности с позиций экономической науки // Инновации и инвестиции. 2020. №. 10. С. 3–6.
- 3. Коркина Т.А., Зотова Е.Н. Зарубежный и отечественный опыт подбора персонала // Общество, экономика, управление. 2021. Т. 6. №. 4. С.58–63.

- 4. Kodama M., Shibata T. Strategy transformation through strategic innovation capability // A case study of Fanuc. R&D Management. 2014. №. 44(1). Pp. 75–103.
- 5. Ries E. The Lean Startup: How Today's the Lean Startup: How Today's Entrepreneurs Use Continuous Innovation to Create Radically Successful Businesses. Crown Business. 2011. 336 p.
- 6. Сламова М.И., Копбосын Л.С. Исследование и разработка информационной системы формирования кадрового потенциала компании // Международный научный журнал «ВЕСТНИК НАУКИ». 2021. №. 5(38). Т.2. С. 154–158.
- 7. Hilbert M. How to Measure «How Much Information»? Theoretical, Methodological, and Statistical Challenges for the Social Sciences // International Journal of Communication 6. 2012. Pp. 1042–1055.
- 8. Васильева М.М. Становление информационного общества в России в условиях глобального информационного пространства // Вестник МГЛУ. Общественные науки. 2020. Вып. 3(840). С. 50—58.
- 9. Kamoun-Chouk S., Berger H., Sie B.H. Towards integrated model of big data (BD), business intelligence (BI) and knowledge management (KM) // Uden, L., Lu, W., Ting, I.-H. (eds.) KMO 2017. CCIS. 2017. Vol. 731. Pp. 482–493.
- 10. Minaee S., Kalchbrenner N., Cambria E., Nikzad N., Chenaghlu M., Gao J. Deep Learning–based Text Classification: A Comprehensive Review. ACM Comput. Surv. − 2021. − №. 54,3. Article 62. − 40 p.
- 11. Martin F., Johnson M. More Efficient Topic Modelling through a Noun Only Approach // Proceedings of the Australasian Language Technology Association Workshop. 2015. Pp. 111–115.
- 12. Denny M.J., Spirling A. Text Preprocessing for Unsupervised Learning: Why It Matters, When It Misleads, and What to Do about It // Political Analysis. 2018. Vol. 26. №. 2. Pp. 168–189.
- 13. Davenport T., Prusak L. Working Knowledge/ Harvard Business Review Press; 2nd edition. 2000. 240 p.
- 14. Munoz D.A., Queupil J.P., Fraser P. Assessing collaboration networks in educational research: A co-authorship-based social network analysis approach // International Journal of Educational Management. − 2016. − V. 30. − №. 3. − Pp. 416–436.
- 15. Li E.Y., Liao C.H., Yen H.R. Co-authorship networks and research impact: A social capital perspective // Research Policy. 2013. T. 42. № 9. C. 1515–1530.
- 16. Cheng, Y., Chen, K., Sun, H., Zhang, Y., Tao, F. Data and knowledge mining with big data towards smart production // Data and knowledge mining with big data towards smart production //Journal of Industrial Information Integration. − 2018. − №. 9. − Pp. 1–13.
- 17. Akerlof G. The Market for Lemons: Quality Uncertainty and the Market Mechanism // Quarterly Journal of Economics. − 1970. − №. 84. − Pp. 485–500.

УДК 004.925

АЛГОРИТМЫ СОЗДАНИЯ HDR ИЗОБРАЖЕНИЙ

Пономаренко Е.А.¹ (студент), Меженин А.В.¹ Научный руководитель – к.т.н., доцент Меженин А.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: mejenin@mail.ru

В работе рассматриваются алгоритмы получения изображений с широким динамическим диапазоном, которые используются в качестве текстурных карт окружения для моделирования окружающего освещения в 3D-сценах. Представлена реализация алгоритмов Дебевека (Debevec) и Робертсона (Robertson) на языке Python в среде разработки Visual Studio Code. Кроме того, в программе реализована возможность тонального отображения HDR изображения на основе методов (гамма, Драго, Рейнхард, Мантюк). Для тестирования полученных HDR изображений в качестве текстурных карт окружения для моделирования освещения созданы 3D-сцены интерьера и экстерьера. Проведена визуальная оценка качества тестовых 3D-визуализаций средствами анкетирования.

Ключевые слова

HDRI алгоритмы, 3D-визуализация, обработка изображений, освещение, реалистичный рендер.

Использование изображений с широким динамическим диапазоном в качестве текстурных карт окружения для моделирования освещения в трехмерных сценах является одним из популярных методов для 3D-визуализации и интеграции синтетических объектов в реальные сцены, поскольку дает в результате очень реалистичные тени, отсветы и отражения. Эти параметры очень важны, например, для правдоподобного отображения металлических, глянцевых и прозрачных предметов.

Динамический диапазон (англ. Dynamic Range, DR) определяется как диапазон от минимального до максимального значения интенсивности света в сцене. Изображения с низким динамическим диапазоном (англ. Low Dynamic Range, LDR) преимущественно являются 8-битными, поэтому каждый канал может хранить только ограниченное количество информации, недостаточное для полного захвата освещенности сцены.

Изображения с широким динамическим диапазоном (англ. High Dynamic Range, HDR) передают весь тональный диапазон реальных сцен, поэтому содержат детали как в светлых, так и в темных областях. Значения яркости в HDR изображении напрямую связаны с количеством света в сцене. В изображениях с широким динамическим диапазоном используются 32-битные значения с плавающей точкой для хранения каждого цветового канала. Таким образом, можно получить интенсивность цвета, недостижимую в LDR изображениях, так как глубина цвета от темного до светлого практически не ограничена.

Наиболее распространенным способом создания изображения с широким динамическим диапазоном является использование фотографий сцены, сделанных с разными значениями экспозиции. При более длительной экспозиции можно получить детали в темных областях сцены, а при более короткой – в ярких. Полученные фотографии сливаются в одно изображение, которое содержит полный диапазон интенсивности света в исходной сцене.

Для создания HDR изображения используется функция отклика камеры (англ. Camera Response Function, CRF), которая связывает значения пикселей с освещенностью реальной сцены, то есть моделирует эффект нелинейности, вносимый в процесс получения фотографии (рис. 1). В качестве алгоритма восстановления CRF были использованы методы Дебевека и Робертсона [1, 2].

Рис. 1. Схема преобразования значений светимости сцены в значения пикселей как для пленочных, так и для цифровых фотографий

На сенсор камеры падает определенное количество света X, которое вычисляется по формуле:

$$X = E\Delta t, \tag{1}$$

где E — освещенность сенсора, пропорциональная яркости реальной сцены, Δt — время экспозиции (значение выдержки).

В процессе оцифровки фотографии каждый i-ый пиксель имеет определенное значение яркости Z_{ij} , которое является нелинейной функцией от исходных значений E_i и Δt_j для каждого i-го пикселя j-го изображения:

$$f(E_i \Delta t_i) = Z_{ii}. \tag{2}$$

Так как функция отклика камеры не является линейной, ее нужно оценить, восстановив карту освещенности на основе значений одних и тех же пикселей при разных значениях выдержки. Восстановление карты освещенности по значениям пикселей может быть получено путем применения обратной функции:

$$E_i \Delta t_j = f^{-1}(Z_{ij}). \tag{3}$$

Для упрощения определим функцию отклика камеры как g:

$$g = \ln f^{-1}. (4)$$

Тогда CRF и формула 3 примет следующий вид:

$$g(Z_{ij}) = \ln E_i + \ln \Delta t_j. \tag{5}$$

Как только функция отклика камеры g будет восстановлена, можно построить карту яркости на основе формулы Дебевека:

$$\ln E_i = \frac{\sum_{j=1}^{N} w(Z_{ij})(g(Z_{ij}) - \ln \Delta t_j)}{\sum_{j=1}^{N} w(Z_{ij})},$$
(6)

где N — количество изображений, w — линейная весовая функция, которая назначается для уменьшения влияния ненадежных пикселей, так как CRF будет менее гладкой и будет хуже соответствовать данным вблизи крайних значений яркости пиксела.

Максимальное значение интенсивности пикселя HDR изображения может значительно превышать динамический диапазон обычного дисплея. Решение этой проблемы заключается в сжатии динамического диапазона без потери деталей таким образом, чтобы отображаемое изображение укладывалось в динамический диапазон дисплея устройства. Это можно осуществить с помощью тонального отображения.

Для реализации алгоритма получения изображений с широким динамическим диапазоном была написана программа на языке программирования Python в среде разработки Visual Studio Code. Дополнительно были подключены библиотеки NumPy, Matplotlib, Piexif и OpenCV. В

качестве исходных изображений были выбраны фотографии с двумя сценариями освещения: «день» и «ночь», каждый из которых представлен в двух вариантах. Фотографии с брекетингом экспозиции были взяты из открытых датасетов.

Разработанная программа была протестирована на ряде фотографий, которые также были использованы для получения HDR изображений в приложениях Picturenaut, Photoshop, EasyHDR и FDRTools. В разработанной программе значения выдержки (времени экспозиции) извлекаются из метаданных EXIF (Exchangeable Image File Format) фотографии. На основе алгоритма Варда реализовано выравнивание исходных изображений, поскольку их несовпадение может привести к серьезным артефактам на результирующем HDR изображении. На рисунке 2 в увеличенной области правого изображения, полученного без выравнивания исходных фотографий, заметны артефакты двоения.



Рис. 2. Слева: HDR изображение, полученное с использованием метода выравнивания. Справа: HDR изображение без использования выравнивания

На основе алгоритмов Дебевека и Робертсона реализовано восстановление функции отклика камеры с использованием значений выдержки и слияние фотографий с разной экспозицией в 32-битное изображение с широким динамическим диапазоном.

Кроме того, в программе реализована возможность тонального отображения HDR изображения на основе четырех методов (гамма, Драго, Рейнхард, Мантюк) и преобразование итогового изображения в 8-битный формат.

Взаимодействие пользователя с программой осуществляется через командную строку. Программа просит указать каталог с исходными изображениями, выбрать HDRI метод и метод тонального отображения (рис. 3).

```
Введите название папки с исходными изображениями: castle
Чтение изображений ...
Чтение значений выдержки ...
Выравнивание изображений ...
Введите название HDR метода (Debevec или Robertson):
Введите название HDR метода (Debevec или Robertson): Debevec
Применение метода Дебевека ...
Вычисление Camera Response Function (CRF) ...
Слияние изображений в одно HDRI ...
Сохранение HDR изображения ...
Введите название метода тонального отображения (Gamma, Drago, Reinhard или Mantiuk): Gamma
Тональное отображение по методу Gamma ...
Сохранение изображения ...
Изображение успешно сохранено по пути castle\results.
```

Рис. 3. Результат взаимодействия пользователя с программой через командную строку

Всего было получено четыре группы изображений, в каждой из которых по шесть HDR изображений, полученных на основе алгоритмов Дебевека и Робертсона в разработанной программе и с помощью Picturenaut, Photoshop, EasyHDR и FDRTools.

Полученные изображения с широким динамическим диапазоном в формате *.hdr имеют визуально заметные различия в динамическом диапазоне (рис. 4). Изображения, полученные в Photoshop и EasyHDR, темнее других. Артефакты двоения можно увидеть на изображениях, полученных в Photoshop и FDRTools. Артефакты в ярких областях присутствуют только на HDR изображении, полученном методом Робертсона. В HDR изображении из программы Picturenaut заметно преобладание красных оттенков.

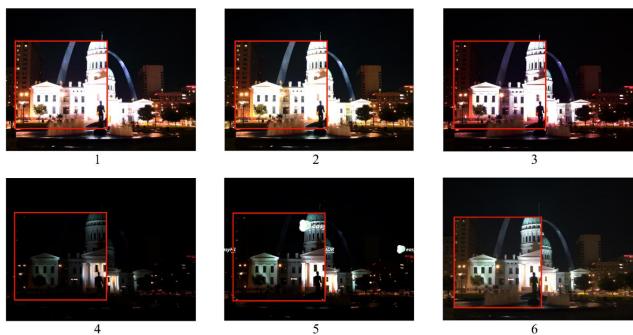


Рис. 4. Метод Дебевека (1); Метод Робертсона (2); Picturenaut (3); Photoshop (4); EasyHDR (5); FDRTools (6)

Освещение на основе изображения (англ. Image Based Lighting, IBL) представляет собой процесс моделирования окружающего освещения 3D-сцен на основе текстурных карт с широким динамическим диапазоном. IBL является эффективным инструментом для интеграции объектов компьютерной графики в реальные сцены. Эта техника была описана Дебевеком и стала использоваться для имитации взаимодействия света между трехмерными объектами и окружающей средой, включая тени, отражения и каустику [3].

Полученные с помощью различных алгоритмов изображения с широким динамическим диапазоном были установлены в качестве карт окружения в Blender для их сравнительного анализа в фотореалистичной 3D-визуализации. В качестве тестовых сцен были созданы сцены интерьера и экстерьера. Модели подбирались таким образом, чтобы отобразить различные материалы, такие как металл, дерево, пластик, стекло, керамика и т. п. В качестве движка рендеринга был выбран Cycles, который моделирует физическое поведение световых лучей. В результате рендеринга тестовых сцен было получено 20 3D-визуализаций, которые были сохранены в формате *.png.

Визуальная оценка качества полученных изображений проводилась средствами анкетирования. В результате проведения пилотного эксперимента, где респондентам для субъективной оценки была представлена предметная 3D-визуализация, в которой в качестве текстурных карт окружения использовались HDR изображения, полученные в существующем ПО, были обнаружены корреляции между оценкой реалистичности освещения и оценкой теней/бликов. Наиболее предпочтительными оказались 3D-визуализации с освещением, смоделированном на основе HDR изображения, созданном в Photoshop.

После пилотного эксперимента было принято решение скорректировать анкету. Для составления формы опроса были проанализированы связанные исследования в области компьютерной графики [4, 5]. Был скорректирован вопрос для оценки наличия опыта или знаний в области компьютерной графики. В качестве оцениваемых параметров 3D-визуализаций было выбрано несколько характеристик: степень соответствия сценарию освещения (дневное или ночное), плотность теней, температура, насыщенность и светлота смоделированного освещения. Оцениваемое изображение теперь отображается вместе с другими изображениями из группы, а не отдельно.

По результатам исследования было выявлено, что субъективные оценки тестовых предметных 3D-визуализаций различаются в зависимости от использованных в качестве текстурных карт окружения изображений с широким динамическим диапазоном, полученных различными алгоритмами. Предлагаемый подход к визуальной оценке смоделированного при помощи HDR изображений освещения может быть использован для повышения реалистичности 3D-визуализаций. В дальнейшем планируется продолжение исследования применения изображений с широким динамическим диапазоном для моделирования окружающего освещения 3D-сцен интерьера и экстерьера.

Список использованных источников

- 1. Debevec P.E., Malik J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs // ACM Press. 1997. Pp. 369–378.
- 2. Robertson M.A., Borman S., Stevenson R.L. Dynamic range improvement through multiple exposures // International Conference on Image Processing. 1999. Pp. 159–163.
- 3. Debevec P. Rendering synthetic objects into real scenes: bridging traditional and image-based graphics with global illumination and high dynamic range photography // ACM Press. 1998. Pp. 189–198.
- 4. Shim H., Lee S. Automatic color realism enhancement for computer generated images // Computers & Graphics. 2012. Pp. 966–973.
- 5. Fan S., Ng T.-T., Koenig B.L., Herberg J.S., Jiang M., Shen Z., Zhao Q. Image Visual Realism: From Human Perception to Machine Computation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2018. Pp. 2180–2193.

УДК 004.925

АНАЛИЗ ПОДОБИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ 3D-МОДЕЛЕЙ

Тонкоглаз $A.C.^1$ (студент), Меженин $A.B.^1$ Научный руководитель — к.т.н., доцент Меженин $A.B.^1$

1 – Университет ИТМО

e-mail: mejenin@mail.ru

В работе исследованы наиболее распространенные методы анализа геометрической формы 3D-моделей, представлен разработанный алгоритм на Python, а также проведён тестовый эксперимент сравнения 3D-моделей. Рассмотренные на первом этапе работы инструменты имеют слабое место, а именно недостаточно информативную визуализацию результатов сравнения. На основе рассмотренных методов предложен и частично реализован в виде программного кода предлагаемый алгоритм, отличающийся от существующих визуализацией данных о расстояниях между полигонами моделями.

Ключевые слова

Обработка 3D-моделей, полигональное моделирование, вектора нормалей, полигональная сетка, геометрическое подобие.

Современные методы обработки трехмерных моделей требуют эффективной работы с большими объемами данных. При анализе трехмерных моделей возникает необходимость в инструментах для сравнения и анализа различных версий, что находит свое применение в таких областях, как как фотограмметрия, при изучении изменения ландшафта. В промышленном проектировании, при работе со сложными поверхностями и моделировании, а также в медицинской диагностике и в задачах оптимизации трехмерных объектов [1, 2].

Первоначально, в данной работе рассматривались существующие программные средства, цель которых это анализ и обработка 3D-моделей, в частности CloudCompare и MeshLab [3]. Были рассмотрены основные алгоритмы обработки, такие как попарное расстояние между вершинами и полигонами моделей, а также анализ расстояния, на основе метрики Хаусдорфа [3, 4]. Данный этап позволил сформировать общую последовательность процесса, который содержит: подготовку моделей, импорт, регистрацию и выравнивание объектов, обработку поверхностей и визуализацию результатов. После изучения данных программных средств рассматривалась библиотека РуМеshLab для Python, которая содержит инструменты обработки 3D-моделей. Рассмотренные фильтры «get Harsdorf distance» и «сотрате models distance from ref mesh» из библиотеки схожи своим функционалом с инструментами обработки в MeshLab, они позволяют вернуть показатель геометрического подобия, однако полученный результат не визуализируется. После анализа существующих инструментов, была начата разработка собственного решения, на основе полученных результатов.

Основными проблемами при работе с объемными 3D-моделями являются: недостаточная точность и неинформативная визуализация результатов анализа. Для решения этой проблемы в работе предлагается улучшить алгоритм анализа подобия геометрической формы 3D-моделей.

Схема алгоритма представлена на рисунке 1. Алгоритм был реализован в среде Visual Studio Code на языке Python. Разработанный код импортирует несколько библиотек, загружает два STL-файла, вычисляет их центры, выравнивает, а затем находит ближайшие полигоны и их центры на обеих моделях. Затем он визуализирует две модели и рисует векторы между каждым полигоном в первой сетке и ближайшим к нему полигоном во второй сетке. Наконец, генерирует гистограмму расстояний.

Помимо существующих библиотек для работы с 3D-моделями для Python (matplotlib, numpy, mpl_toolkits, numpy-stl и т. д.) были разработаны собственные функции, которые выравнивают модели по их геометрическому центру, находят центры полигонов модели и формируют вектора между полигонами сравниваемых моделей, а также генерирует цветовую карту и визуализирует результат. На этапе визуализации используется цветовая карта для преобразования числовых значений в цвета на основе их относительного положения в диапазоне от минимального до максимального значения. Для наибольшей информативности была выбрана цветовая схема, которая не имеет в своем диапазоне белого цвета.



Модель Stanford Bunny:
27867 точек (далее модель Б)

Оптимизированная модель на
95%: 1741 точек (далее модель A)

Рис. 1. Схема алгоритма

Рис. 2. Тестовые модели

Для проведения тестирования была подготовлена пара моделей Stanford Bunny, взятых из открытого репозитория Стэнфордского университета, модели представлены на рисунке 2 [5]. Во второй модели была проведена оптимизация сетки на 95%, посредством модификатора ProOptimize в 3Ds Max.

Было проведено сравнение полигональных сеток модели А и модели Б. Расчёты производились для каждого полигона, что составило 3448 итераций. На визуализации можно увидеть, что у модели есть явные области с наибольшими расстояниями между моделями, которые отмечены красным цветом полигонов. Визуализация представлена на рисунке 3.

Черные отрезки — это векторы, соединяющие центры полигонов. На данной визуализации, представленной на рисунке 4, вторая модель скрыта, чтобы оценить корректность отрисовки вектора. При приближении можно заметить, что вектора построены верно, между центрами полигонов.

При отрисовке обеих моделей, визуализация становится менее информативной так как видны перекрытия поверхностей, однако это позволяет оценить расстояния между полигональными сетками и направление расстояний. Визуализация представлена на рисунке 5. Так как поверхности могут пересекаться как в продемонстрированном эксперименте, полученная визуализация считается авторами недостаточной наглядной. Поэтому было решено на следующем этапе либо адаптировать существующие библиотеки, либо разработать собственную, которая позволит более информативно отрисовать две модели одновременно, а именно перекрытие полигональных сеток.

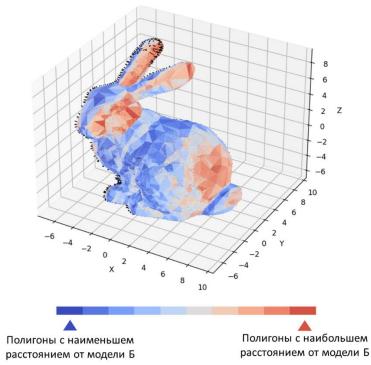


Рис. 3. Визуализация модели А с цветовой картой расстояний

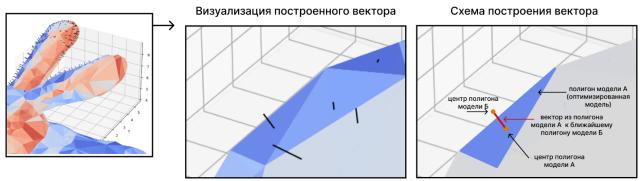


Рис. 4. Визуализация построение вектора между моделями

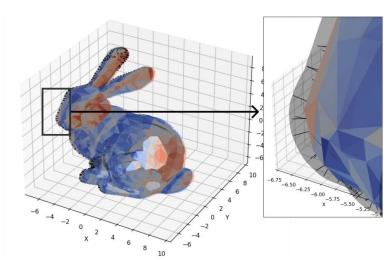


Рис. 5. Визуализация обеих моделей и расстояний между ними

После визуализации моделей алгоритм выводит гистограмму расстояний, представленной на рисунке 6. Вертикальная ось (count) — количество полигонов модели А. Горизонтальная ось (distances) — расстояния между полигонами моделей. На основе измеренных расстояний

назначается цвет. Цветовой диапазон соответствует цвету полигонов модели A, то есть расстоянию. Стоит отметить, что в сравнении с рассмотренными ранее инструментами в программах CloudCompare, MeshLab, данная визуализация отображает цвет относительно длины вектора, а не относительно координатных осей, что позволяет улучшить наглядность при оценке расстояний между полигонами моделей.

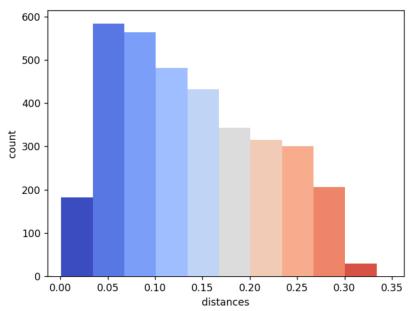


Рис. 6. Гистограмма расстояний

На данном этапе удалось разработать фрагмент кода для алгоритма анализа геометрического подобия 3D-моделей. Данный алгоритм отличается от существующих тем, что выстраивает расстояния из центров полигонов и отображает их непосредственно на визуализации. В дальнейшей работе планируется:

- 1. Разработать фрагмент кода, задача которого определить показатель подобия.
- 2. Оптимизировать разработанное решение, так как на данном этапе было замечено, что разработанный алгоритм не решает задачу быстрее или приближено по скорости в сравнении с существующими алгоритмами.
- 3. Уточнить процесс отрисовки моделей. Применяемые модули визуализации имеют свои ограничения, такие как порядок отрисовки данных на графике. Из-за этого возникают сложности с анализом полученных результатов. Планируется адаптировать либо существующие библиотеки, либо разработать собственную.
- 4. Исследовать эффективность итогового разработанного решения по сравнению с существующими.

Список использованных источников

- 1. White M.A., Campione N.E. A three-dimensional approach to visualize pairwise morphological variation and its application to fragmentary palaeontological specimens // PeerJ. 2021. T. 9. P. e10545.
- 2. Vranic D.V., Saupe D. 3D model retrieval : дис. PhD thesis : University of Leipzig, 2004.
- 3. Mezhenin A., Zhigalova A. Similarity analysis using Hausdorff metrics // CEUR Workshop Proceedings. 2019. Vol-2344. 8 p.
- 4. Извозчикова В.В., Меженин А.В. Размерность Хаусдорфа в задачах анализа подобия полигональных объектов // Интеллект. Инновации. Инвестиции. 2016. №. 2. С. 109—112
- 5. The Stanford 3D Scanning Repository. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://graphics.stanford.edu/data/3Dscanrep/ (дата обращения: 21.11.2023).

УДК 004.92:004.94

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПРОРЕЖИВАНИЯ ОБЛАКОВ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ МЕТРИКИ ХАУСДОРФА

Махиня Д.А.¹ (аспирант), Меженин А.В.¹ Научный руководитель – к.т.н., доцент Меженин А.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: mejenin@mail.ru

Обработка данных облаков сложных объектов, состоящих из множества точек, требует высоких вычислительных мощностей. Большие объемы данных вызывают проблемы при их хранении и преобразовании в качественные 3D-модели. Возникают сложности обработки данных в реальном времени. Таким образом, задача удаления избыточных точек с сохранение значимых визуальных признаков является актуальной задачей. В работе дано краткое описание модифицированного алгоритма на основе метрики Хаусдорфа. Приведены результаты прореживания на тестовых моделях. Сравнение проводилось с одним из распространенных алгоритмов реализованного на оценках расстояний пространственной окрестности точек выборки.

Ключевые слова

Облака точек, методы прореживания, метрика Хаусдорфа, тепловые карты.

Облака точек создаются системами лазерного сканирования или средствами фотограмметрии. Так как облака точек позволяют выражать форму объектов различных размеров, технология активно применяется в таких областях, как архитектура, строительство и при создании топографических карт. В отношении моделирования сложных объектов количество точек в облаке точек может достигать уровня десятков миллионов. Такие объемы данных не улучшают качество будущей модели, однако могут существенно усложнить их обработку и хранение. Соответственно, важной задачей первого этапа обработки облаков точек является удаление избыточных данных для сохранения целостности и геометрических особенностей объекта при дальнейшей трехмерной реконструкции [1, 2].

Основу разрежения облаков точек составляет эффективное построение пространственного индекса на основе информации о соседних точках. При этом модели с малым количеством точек зачастую подвергаются прореживания с низкой точностью, а модели с большим количеством точек требую много времени на вычисления и больших технологических мощностей. Таким образом, для достаточно большого круга задач, требуется быстрый, точный и нетребовательных к мощностям алгоритм прореживания. Для решения вышеуказанных проблем, в данной работе предлагается алгоритм, основанный на модифицированной метрике Хаусдорфа.

Расстояние Хаусдорфа — это мера сходства между двумя наборами точек X и Y [3]. Использование этой величины позволяет идентифицировать наибольшее расхождение между наборами. Достоинство использования расстояния Хаусдорфа перед другими метриками сходства заключается в том, что оно не может быть равно нулю, пока оба набора точно не совпадут

$$f = \max\{d(X,Y), d(Y,X)\}, d(X,Y) = \max_{x \in X} d(x,Y).$$
 (1)

Предлагаемая авторами модификация заключается в расчете прямого и обратного расстояния между точками облаков. В отличие от обычной Хаусдорфовой метрики, вычисляется не максимальное, а усредненное значение расстояния. Предполагается, что модифицированная метрика Хаусдорфа будет более устойчива к выбросам, монотонно

увеличиваясь по мере уменьшения сходства между двумя наборами данных, и покажет свою эффективность в качестве метрики сходства:

$$f = \max\{d(X,Y), d(Y,X)\}, \ d(X,Y) = \frac{1}{N_X} \sum_{x \in X} d(x,Y).$$
 (2)

На основе описанного математического аппарата, был реализован алгоритм, который позволяет определять, насколько точка в облаке, относительно ее положения на поверхности и относительно соседних точек, влияет на общую геометрию модели и позволяет понять, можно ли ее удалить без каких-либо искажений [2, 3]. Предлагаемый подход «Модифицированная метрика Хаусдорфа» – Modified Metric Hausdorff (ММН) реализован в виде .m функции в среде Matlab.

Для оценки предлагаемого решения в качестве метода для сравнения выбран алгоритм, основанный на оценках расстояний пространственной окрестности точек выборки - Sample Point Spatial Neighborhood (SPSN) [4]. Для сравнения алгоритмов и оценки их эффективности и стабильности работы были выбраны наборы данных разной плотности — Стенфордский кролик (Stanford Bunny) и Античная скульптура (Antique Sculpture). Результаты прореживания модели Stanford Bunny алгоритмами SPSN и MMH (рис. 1).

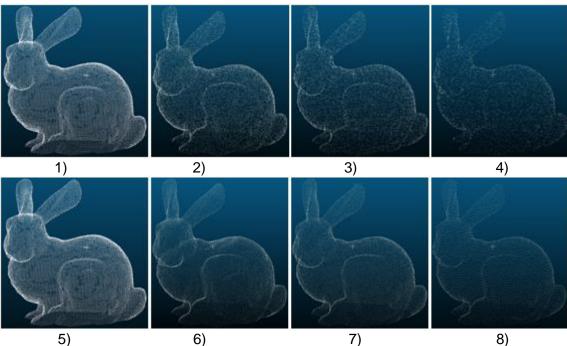


Рис. 1. Прореживание алгоритмами SPSN(1-4) и MMH(5-8) – 100%, 80%, 60%, 40% для модели Stanford Bunny

Визуальная оценка полученных результатов – при использовании алгоритма SPSN видна некоторая потеря структуры модели, а также изменение геометрии сложных переходов поверхностей модели, таких как уши и лапы кролика. При этом в результате работы алгоритма ММН можно считать получается равномерное прореживание, с заметным сохранением геометрии, без потери визуальных особенностей. Аналогичный результат получен при прореживании облака точек модели Antique Sculpture (рис. 2).

Для оценки визуальных различий результатов прореживания использованы тепловые карты, как инструмент оценки разницы между двумя распределениями [5]. При построении тепловых карт использовалась адаптивная шкала абсолютных значений отклонений (различий) значений пикселей анализируемых изображений. Кроме этого использовались кумулятивные оценки — тепловые карты, полученные на основе сравнения тепловых карт различий. Для построения матрицы отличий использовались следующие алгоритмы.

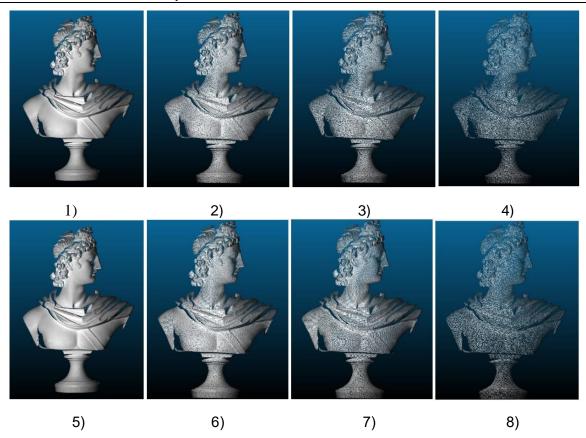


Рис. 2. Прореживание тестовой модели алгоритмами SPSN (1-4) и MMH (5-8) – 100%, 80%, 60%, 40%

Алгоритм с нормализацией. Значения каждого элемента матрицы различий делится на вычисляемое максимальное значение данной матрицы. Полученная величина умножается на максимально возможное значение кода цвета пикселя в модели RGB (например, 255 для 8-битного изображения).

Матрица суммы – нормализация относительно отношения значений разностей и сумм сравниваемых пикселей. Значения матрицы отличий n*m вычисляется по формуле:

$$D_{ij} = \frac{|A_{ij} - B_{ij}|}{A_{ij} + B_{ij}}, \ i = 0..n, \ j = 0..m,$$
(3)

где $A_{i,j}$ и $B_{i,j}$ обозначают значения кодов цвета пикселей (i,j) в модели RGB на первом и втором сравниваемых изображениях, соответственно, а D – результирующая матрица, имеющая тот же вид, что и исходные изображения.

Относительная разница цвета пикселей. Вычисляется логарифм отношения значений пикселей сравниваемых изображений. При нулевых значениях цвета используется формула смещения:

$$H_{ij} = \frac{P_{ij} + 1}{S + M * N}, \tag{4}$$

где P_{ij} и H_{ij} – значение кода цвета пикселя в модели RGB, S – сумма всех значений изображения, M*N – размер изображения. После выполнения смещения для обоих изображений составляется матрица различий по формуле:

$$D_{ij} = log\left(\frac{B_{ij}}{A_{ij}}\right), \ i = 0..M, \ j = 0..N.$$
 (5)

Рассмотренные алгоритмы формирования матрицы различий повышают степень наглядности получаемых тепловых карт по сравнению с картами, полученными обычным

вычитанием. На рисунке 3 представлен результат оценки двух распределений для модели Antique Sculpture в виде тепловой карты с адаптивной шкалой.



Рис. 3. Тепловая карта различий двух распределений

По оценке результатов прореживания полученных двумя методами, можно считать, что для модели Стэнфордский кролик заметна более высокая упорядоченность точек и минимальное искривление исходной геометрии в случае использования алгоритма ММН. В данном случае, у алгоритма SPSN упущены точки, формирующие геометрию визуальных признаков, что делает их менее распознаваемыми. Для Античной скульптуры также наблюдается более упорядоченная структура точек после прореживания исследуемым методом и нарушение геометрии в случае базового метода, в частности, после прореживания базовым методом были утеряны точки, которые были важны для формирования визуально важных признаков, что делает модель более бесформенной и менее распознаваемой.

Кроме визуальных показателей на эффективность исследуемого алгоритма указывают численные данные, для обоих наборов данных средняя погрешность, полученная путем сравнения исходных моделей и итоговых после прореживания. Для получения численных оценок качества прореживания моделей использована величина среднеквадратичного отклонения (СКО) [2], при вычислении которой использовались относительные значения отклонения от 0 — нет отклонения, до 1 — максимальное отклонение. Величина отклонения от исходной модели в зависимости от процента прореживания для тестовых моделей представлены на рисунки 4.

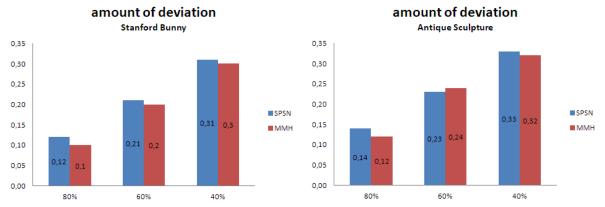


Рис. 4. Величины отклонения для двух алгоритмов для разного уровня прореживания

Таким образом, можно считать, что предлагаемый алгоритм может быть использован для прореживания облаков точек при сохранении высокой точности модели с минимальными искажениями исходной геометрии. Это в перспективе позволит сделать использование больших моделей более удобным, а также более доступным для обычных пользователей. В дальнейшем планируется исследовать прореживание с помощью этого алгоритма облаков с большим количеством точек, около нескольких миллионов и исследовать возможности

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Мультимедиа-технологии, дизайн и юзабилити

уменьшения итоговой погрешности для создания еще более точных моделей. В настоящей работе расчет тепловых карт проводился в двух измерениях. В дальнейшем планируется использование 3D тепловых карт.

Список использованных источников

- 1. Li P., Wang R., Wang Y., Tao W. Evaluation of the ICP Algorithm in 3D Point Cloud Registration // IEEE Accesss. DOI 10.1109/ACCESS.2020.2986470.
- 2. Mezhenin A.V. и др. Point Cloud Registration Hybrid Method // CEUR Workshop Proceedings, 12th Majorov International Conference on Software Engineering and Computer Systems. CEUR. 2020.
- 3. Mezhenin, A., Zhigalova, A. Similarity analysis using Hausdorff metrics // CEUR Workshop Proceedingsio. 2019. Vol-2344. 8 p.
- 4. Jiaxing W., Maolin X., Hongling X. A Point Clouds Fast Thinning Algorithm Based on Sample Point Spatial Neighborhood // Journal of Information Processing Systems. − 2020. − Vol. 16. − №. 3. − Pp. 688 − 698.
- 5. Mezhenin A.V., Izvozchikova V.V., Mezhenin I.A. Evaluation of Illumination in 3D Scenes Based on Heat Maps Comparison // JAIT 2023. Vol. 14(3). Pp. 601–605. DOI: 10.12720/jait.14.3.601-605.

Программная инженерия и компьютерные технологии

УДК 004.023

UNSUPERVISED LEARNINGT FOR PRENATAL CARE FROM OBSTETRIC RECORDS

Enkomaryam B.C.¹ (student) Scientific Supervisor – D.Sc, Professor Bessmertny I.A¹

1 – ITMO University

e-mail: benkomariam@itmo.ru, bessmertny@itmo.ru

This article is devoted to the issues of maternal health as directly affects the health of the newborn infant. Machine learning has emerged as the most effective method for uncovering the pertinent information in healthcare organizations. The paper describes a clustering model using unsupervised machine learning techniques for prenatal care from obstetric local records.

Keywords

Unsupervised machine learning, prenatal care, maternal health, K-means, obstetrics.

The World Health Organization (WHO) [1] estimates that problems related to pregnancy and delivery claim the lives of about 300,000 women worldwide each year. In addition, three million newborns are thought to pass away in their first month of life. These figures emphasize how critical it is to raise the standard of maternity and neonatal healthcare globally. Prenatal care is one of the most effective health interventions for preventing maternal morbidity and mortality particularly in places where the general health status of the women is poor [1]. According to the WHO, Ethiopia has a maternal death ratio of about 401 per 100,000 live births and a newborn mortality rate of about 30 per 1,000 live births. These facts show that much more needs to be done to enhance Ethiopia's maternal and neonatal health outcomes.

The results of this research can help importantly to offer meaningful suggestions for health policy and decision makers, and stakeholders found at various levels about the pregnant women follow up status in order to take part in solving the problem. It also helps for the achievement of the millennium development goal (4 and 5) in reducing child mortality and improving maternal health by take timely measure accordingly and to make guidance and counseling services while arranging sound awareness creation schemes so as to scale up the positive attitudes of the women towards the prenatal care services.

Since historical experience, ground truth, health care data, resource management data, and transformed data are all used in traditional health care decision-making. It is therefore advised to use machine learning techniques in the healthcare sector. Artificial intelligence and machine learning technologies play a significant role in decreasing maternal and infant mortality rates through the analysis of health information. Therefore, the main objective of the study is to build the clustering model using unsupervised machine learning techniques for prenatal care from obstetric local records. In this study the data is taken from University of Gondar Referral Hospital Dabat Research Center database, Ethiopia. The hybrid six-step Cios model of knowledge discovery process is followed to explore the application of machine learning on eight years obstetrics dataset. Clustering algorithms are utilized as means to address the research problem using Waikato Environment for Knowledge Analysis (WEKA) 3.9.1 machine learning tool.

In this study the conceptual design science research framework which is the problem-solving paradigm has its roots in engineering and the sciences of the artificial was adopted for understanding, executing and evaluating this research.

A total of 5990/6700 training dataset with 14/40 selected attributes were taken for this study. For the modeling of the cluster, the K-means, Expectation Maximization (EM) and Make-Density clustering was carried out by changing the standard parameters. To measure the goodness of the cluster,

cluster sum of square errors (SSE), the number of iteration (i), time complexity (in second) and the opinion of the domain expert have been used [3].

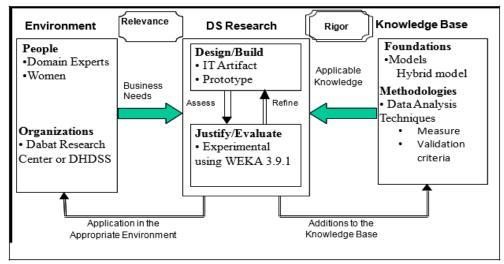


Fig. 1. Research Framework based on Hevner et al. [2]

Table 1

Final selected attributes

S.N.	Attribute Name	Data Type	Gain ratio Value	Description	Information Gain Value	Remark
1	anc_attend	Nominal	0.78-1 st	Attend ANC (Antenatal care)	0.75052-3 rd	
2	hiv_test	Nominal	0.53-2 nd	HIV test	0.53296-4 th	
3	anc_place	Nominal	0.48-3 rd	Place of ANC attend.	0.79921-1st	
4	anc_freq	Nominal	0.35-4 th	Number of ANC frequency	0.77332-2 nd	
5	curr_vacc	Nominal	0.24-5 th	Vaccination	0.23148-5 th	
6	prev_preg_f	Nominal	0.09-6 th	Previous pregnancy frequency	0.13579-6 th	
7	location	Nominal	0.08-7 th	Location of the women live in now	0.05128-9 th	Derived attribute
8	woman _age	Nominal	0.05-8 th	Age of a woman (categorized with five age groups)	0.11451-7 th	Derived attribute
9	educ_categ	Nominal	0.05-9 th	Education category of the women	0.06251-8 th	
10	prev_preg_ outcome	Nominal	0.04- 10 th	Previous pregnancy outcome	0.02591-10 th	
11	m_status	Nominal	0.03- 11 th	Marital status of the mother	0.01556-11 th	
12	preg_inten	Nominal	0.03- 12 th	Is the current pregnancy intended?	0.01393-12 th	
13	first_preg	Nominal	0.02- 13 th	First pregnancy	0.00576-13 th	

After discussing with the domain experts, we agreed to make k=3 predefined, cluster labels (high, medium and low status) of women pregnancy observation in order to have appropriate clusters based on the number of classes. Based on their distance similarity (number of iteration and the Log likelihood), a total of 6 cluster models were developed (three using k-means, two using Density based and one using EM. In EM the intra-cluster agreement was not good, thus no further experiment was needed, based on [3].

Table 2

Comparison cluster result of used algorithms

			U					
Clustering Algorithms	Expt	Distance	Seed	N <u>o</u> of_iteration	SSE	Time (sec.)	Log likelihood	numFolds
	1	Euclidean Distance	10	3	17094	0.06	_	_
K-means	2	Euclidean Distance	100	5	16963	0.11	_	_
	3	Manhatta nDistance	1000	3	17143	0.08	_	_
MakeDensity	4	Euclidean Distance	10	3	17094	0.92	-8.45477	_
BasedClusterer	5	Euclidean Distance	100	3	_	0.25	-8.88423	_
EM	6	_	100	9	_	0.13	-7.97252	10

As one can see from Table 2 the sixth experiment indicates higher number of iteration amongst other experiments which is greater by 4 with the second experiment and by 6 with the first, third, fourth, and fifth experiments. On the other hand, the sixth experimentation log likelihood shows the least as compare to the 4th and 5th experimentations. This indicates that in terms of likelihood EM algorithm is better than MakeDensityBasedClusterer clustering algorithm. However, in Log likelihood both EM and MakeDensityBasedClusterer clusters have negative values which does not show its perfection in results. We can infer that K-means algorithm is much better than EM & MakeDensityBasedClusterer clustering in time to build model. EM algorithm also takes less time than MakeDensityBasedClusterer clustering algorithm to build the model.

In addition to this the domain experts are consulted to give their suggestion whether the clustering result matches with the business. According to the domain experts [4], the model created by the first cluster is good in segmenting the woman record as compare to the other five clustering which have less time to build the model with minimum number of sum of square errors and number of iteration. Generally, on the basis of this research and above result, we found that k-means clustering algorithm is better algorithm as compared to other algorithms.

Table 3 Cluster summary of the first experiment for K=3, seed=10, Euclidean distance

Cluster	Cluster centroids	Rank	Status
0	Live birth, Multipara, Not first pregnancy, Rural, Wanted pregnancy, Not living with husband, ANC is not attend, Nowhere, Zero, Yes to current vaccination, No HIV test, Illiterate	2	Medium
1	Live birth, Multipara, Not first pregnancy, Rural, Wanted pregnancy, Living with husband, ANC attend, Health Center, Thrice, Yes to current vaccination, Yes to HIV test, Illiterate	1	High
2	Live birth, Grand Multipara, Not first pregnancy, Rural, Wanted pregnancy, Living with husband, ANC is not attend, Nowhere, Zero, No to current vaccination, No HIV test, Illiterate	3	Low

As can be seen from Table 3, the first cluster indicate that the previous pregnant outcome is live birth, the previous pregnant frequency is multipara (between 2 and 5 delivery), the current pregnancy is not first pregnancy, the woman age group is between 20 and 24, the woman location is rural, the current pregnancy is wanted, marital status is not living with husband, ANC is not attend, ANC place is Nowhere, ANC frequency is zero time, current vaccination is taken, HIV test is not taken and education category of the woman is Illiterate. Based on the above features of cluster 0 and discussion with domain experts, this cluster ranked 2 with follow up status of Medium.

The second cluster have the previous pregnant outcome is live birth, the previous pregnant frequency is multipara, the current pregnancy is not first pregnancy, the woman age group is between

15 and 19, the woman location is rural, the pregnancy is wanted, marital status is living with husband, ANC is attend, ANC place is at hospital, ANC frequency is thrice times, current vaccination is taken, HIV test is taken and education category of the woman is Illiterate. Therefore, the above features of cluster 2 and discussion with domain experts, this cluster ranked 1 with follow up status of High.

The third cluster contains attribute value with the previous pregnant outcome is live birth, the previous pregnant frequency is multipara, the current pregnancy is not first pregnancy, the woman age group is between 25 and 29, the woman location is rural, the current pregnancy is wanted, marital status is not living with husband, ANC is not attend, ANC place is Nowhere, ANC frequency is zero time, current vaccination is taken, HIV test is not taken and education category of the woman is Illiterate. After consulting the domain experts, this cluster ranked 3 with follow up status of Low.

According to the domain experts this model created by the k-means cluster is good in segmenting the woman record which have less time to build the model with minimum number of sum of square errors and iteration. Therefore, this model is selected as the final clustering model that used as an input (cluster index) for classification modeling.



Fig. 2. Selected Cluster Model (K-means) Visualization

The result of this study indicates that applying unsupervised machine learning techniques to cluster the women records is very promising. However, in this study, the cluster result is not still used as an input to develop the predictive model.

Therefore, future research directions are forwarded to come up with a predictive model based on this labeled clustered data using supervised machine learning techniques and then integrating its results with applicable decision support system in the area of the study.

Acknowledgement

The authors thank Dabat Research Center at the University of Gondar (Gondar, Ethiopia) for providing the dataset for this study.

References

- 1. World Health Organization (WHO) and UNICEF. Countdown to 2015: Maternal, Newborn and Child Survival: Building a Future for Women and Children: The 2012 Report. Geneva; 2012. DOI:10.1016/S0140-6736(15)00519-X.
- 2. Alan R.H., Salvatore T.M., Jinsoo P. Design Science in Information Systems Research // MIS Quarterly. − 2004. − Vol. 28. − №. 1. − Pp. 75–105.
- 3. Theodoridis S., Koutroubas K. Pattern Recognition // Academic Press. 2009. P. 376.
- 4. Pinhanez C.S. Machine Teaching by Domain Experts: Towards More Humane, Inclusive, and Intelligent Machine Learning Systems // arXiv:1908.08931v1 [cs.CY] 19 Aug 2019.

УДК 681.5

ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И НЕПРЯМОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИ ПОЗИЦИОНИРУЕМЫМ НАДВОДНЫМ СУДНОМ

Живицкий А.Ю. 1 (аспирант), Захаров Д.Н. 1 (аспирант), Бершак Н.В. 1 (студент), Ларченков А.А. 1 (студент) Научный руководитель — старший научный сотрудник Борисов О.И. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: zhivitckii@itmo.ru, dnzakarov@itmo.ru, bershak kolya@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В работе рассматривается две задачи: задача параметрической идентификации и задача траекторного управления. Исходная модель надводного судна в форме Эйлера-Лагранжа преобразована к виду линейной регрессии, параметры которой оцениваются при помощи одного из рассмотренных методов: градиентного спуска, расширенного фильтра Калмана и динамического расширения регрессора. Далее приведен синтез непрямого адаптивного управления на основе решения обратной задачи динамики. Настройка коэффициентов регулятора происходит за счет получаемых в реальном времени оценок параметров модели. Анализ устойчивости системы доказан с применением метода функций Ляпунова. Работоспособность алгоритма произлюстрирована результатами компьютерного моделирования.

Ключевые слова

Адаптивное управление, надводное судно, градиентный спуск, расширенный фильтр Калмана, динамическое расширение регрессора.

Прогресс современных технологий в области материаловедения, систем навигации и управления, вычислительной техники делает всё более популярными разработки беспилотных надводных судов. Роботизированные надводные суда могут применяться как средство для мониторинга климатических условий. Одним из преимуществом их применения является автоматическая работа в опасных для здоровья человека условиях. Для компенсации неопределенностей моделей надводных судов применяют адаптивные методы управления. Такие системы требуют новые решения и подходы к синтезу законов управления и становятся всё более актуальными у разработчиков и исследователей.

Уже существующие решения опираются на модели динамики робототехнических систем Эйлера-Лагранжа и Номото [1, 2]. Для анализа поведения системы или создания контроллеров с использованием одной из этих моделей необходима информация о параметрах системы, к которым относятся массо-инерционные параметры, параметры Кориолиса, гидродинамические и прочие. Для улучшения качества моделирования и повышения её детализации требуется увеличить количество параметров. Однако, в режиме динамического позиционирования, количеством параметров можно оправданно пренебречь. Тем не менее, параметры, определяющие доминирующую динамику, могут изменяться в зависимости от полезной нагрузки судна, его осадки.

Для оценивания неизвестных параметров может быть применен расширенный фильтр Калмана, как модификация классического фильтра Калмана [3], который выделяется достаточно низкой вычислительной сложностью относительно методов интеллектуального обучения. В работе рассматривается сравнение расширенного фильтра Калмана и нового метода динамического расширения регрессора, описанного в работе [4]. В применении к линейным регрессиям обеспечивает более быструю сходимость относительно других методов [5].

В работе рассмотрены три метода оценки: градиентный спуск, расширенный фильтр Калмана и динамическое расширение регрессора. Полученные оценки были применены для

настройки в режиме реального времени коэффициентов регулятора на базе обратной задачи динамики. В работе представлены результаты компьютерного моделирования для каждого случая получения оценок, соединенных с контроллером. Экспериментальные исследования были проведены на лабораторной установке, где изучалось движение надводного судна с одной степенью свободы.

Рассмотрим линеаризованную математическую модель движения надводного судна с тремя степенями свободы (нагон, раскачивание, рыскание) без возмущений

$$\dot{N} + Dv = \tau, \tag{1}$$

где $\eta = [x \ y \ \psi]^T$, $\nu = [u \ v \ r]^T$ и $\dot{\nu} = [\dot{u} \ \dot{v} \ \dot{r}]^T$ — векторы обобщённых координат, скоростей и ускорений соответственно, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \tau_3]^T$ — вектор управляющих сил и моментов из каждого канала управления, M — матрица инерции, D — матрица демпфирования вида:

$$M = \begin{bmatrix} m - X_{\dot{u}} & 0 & 0\\ 0 & m - Y_{\dot{v}} & mx_g - Y_{\dot{r}}\\ 0 & mx_g - N_{\dot{v}} & I_Z - N_{\dot{r}} \end{bmatrix}, \tag{2}$$

$$D = \begin{bmatrix} -X_u & 0 & 0\\ 0 & -Y_v & -Y_r\\ 0 & -N_v & -N_r \end{bmatrix}, \tag{3}$$

где m — масса судна, x_g — расстояние между центром тяжести и началом системы координат тела, I_z — инерция корабля относительно оси тела Z, $X_{\dot{u}}$, $Y_{\dot{v}}$, $Y_{\dot{r}}$, $N_{\dot{v}}$, $N_{\dot{r}}$ — добавленная масса нулевой частоты при нагоне, раскачивании и рыскании из-за ускорений вдоль соответствующих осей, также называются гидродинамическими коэффициентами, X_u , Y_v , Y_r , N_v , N_r — линейные составляющие демпфирования вдоль соответствующих осей.

Сделаем предположение о неизвестности всех параметров. Теперь можно представить модель (1) как линейную регрессию:

$$\phi^{\mathrm{T}}(\nu,\dot{\nu})\theta = \tau,\tag{4}$$

где $\phi^{\mathrm{T}}(\nu,\dot{\nu})$ – регрессора вида

и θ – вектор неизвестных параметров, определяемый формулой

$$\theta = [\theta_1 \quad \theta_2 \quad \theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \theta_6 \quad \theta_7 \quad \theta_8 \quad \theta_9 \quad \theta_{10}]^T,$$

где параметры θ_i , $i=\overline{1,10}$ определены как

$$\begin{split} \theta_1 &= m - X_{\dot{u}}, \, \theta_2 = -X_u, \, \theta_3 = m \, - \, Y_{\dot{v}} m x_g \, - \, Y_{\dot{r}}, \, \theta_4 = m x_g \, - \, Y_{\dot{r}} m x_g \, - \, N_{\dot{v}}, \\ \theta_5 &= - \, \, Y_v, \, \theta_6 = - \, \, Y_r, \, \theta_7 = m x_g \, - \, N_{\dot{v}}, \, \theta_8 = I_Z \, - \, N_{\dot{r}}, \, \theta_9 = - \, \, N_v, \, \theta_{10} = - \, \, N_r. \end{split}$$

Для разработки непрямой адаптивной системы управления первым этапом необходимо получить оценку неизвестных параметров объекта. Математически эта цель формулируется как следующее уравнение:

$$\lim_{t \to \infty} \left\| \tilde{\theta}(t) \right\| = 0,\tag{5}$$

где $\tilde{\theta}(t) = \hat{\theta}(t) - \theta$ — ошибка оценки между полученными значениями $\hat{\theta}(t)$ и истинными значениями параметров θ .

Следующий этап включает в себя настройку коэффициентов непрямого адаптивного контроллера, который должен обеспечить основную цель траекторного управления:

$$\lim_{t \to \infty} \|\tilde{\eta}(t)\| \le \varepsilon,\tag{6}$$

где $\tilde{\eta}(t) = \eta(t) - \eta_{ref}(t)$ – ошибка слежения объекта за заданной траекторией, рассчитывается как разница между выходным сигналом объекта $\eta(t)$ и задающим сигналом $\eta_{ref}(t)$, ε – некоторая произвольно малая область в окрестности нуля.

На практике, для измерения положения и угла курса надводного судна используются GPS и магнитометр, в то время как измерение скорости может быть затруднено, допустим, из-за выхода из строя систем IMU. Поэтому мы делаем допущение, что доступны для измерения только положения, угол курса и скорости судна.

Для оценки скоростей и ускорений мы используем линеаризованную модель надводного судна (1) и применяем линейный дифференциальный фильтр второго порядка $\lambda_f = \frac{\lambda s^2}{(s+\lambda)^2}$.

Приведем три различных подхода к оценке: метод градиентного спуска, расширенный фильтр Калмана и метод динамического расширения и смешивания регрессора для достижения цели (5).

Для всех этих методов определим квадратичный функционал

$$J(\hat{\theta}) = \frac{1}{2} (\tau - \phi^{\mathrm{T}}(\nu, \dot{\nu})\hat{\theta})^{2}, \tag{7}$$

Учитывая задачу минимизации которого, перейдем к разработке алгоритмов оценивания.

Алгоритм оценивания, основанный на градиентном спуске, имеет вид

$$\dot{\hat{\theta}} = \gamma \phi(\nu, \dot{\nu}) (\tau - \phi^{\mathrm{T}}(\nu, \dot{\nu}) \hat{\theta}), \tag{8}$$

где $\gamma>0$ $\gamma>0$ — параметр настройки, определяющий размер шага на каждой итерации при движении к минимуму. Правильный выбор параметра $\gamma>0$ приводит к желаемой скорости сходимости оценки.

Расширенный фильтр Калмана является стандартным алгоритмом в навигации. Для оценки используется соответствующие выражения:

$$\dot{\hat{\theta}} = \hat{\Gamma}\phi(\nu,\dot{\nu}) \left(u - \phi^{T}(\nu,\dot{\nu})\hat{\theta}\right),$$

$$\dot{\hat{\Gamma}} = -\hat{\Gamma}\phi(\nu,\dot{\nu})\phi^{T}(\nu,\dot{\nu})\hat{\Gamma} + \beta\hat{\Gamma},$$

$$k_{0}I \ge \hat{\Gamma}(0) = \hat{\Gamma}(0)^{T} > 0,$$
(9)

где $\hat{\Gamma}$ – матрица коэффициентов усиления, $\beta > 0$ – коэффициент регуляризации, k_0 – начальное значение матрицы коэффициентов усиления адаптации.

Метод динамического расширения регрессора основан на градиентном спуске, применяемого к каждой строке расширенной матрицы регрессии, тем самым алгоритм оценивает каждый параметр независимо. Разделим модель полученную модель линейной регрессии (4) как:

$$\varphi_1^T(v, \dot{v})\vartheta_1 = \tau_1$$

$$\varphi_2^T(v, \dot{v})\vartheta_2 = \tau_2,$$

$$\varphi_3^T(v, \dot{v})\vartheta_3 = \tau_3$$

где $\varphi_1^T(v,\dot{v}), \varphi_2^T(v,\dot{v})$ и $\varphi_3^T(v,\dot{v})$ — регрессоры получается путем разделения строк и исключения нулей в $\varphi^T(v,\dot{v})$

$$\varphi_1 = \begin{bmatrix} \dot{u} \\ u \end{bmatrix}, \varphi_2 = \varphi_3 = \begin{bmatrix} \dot{v} \\ \dot{r} \\ v \end{bmatrix},$$

где ϑ_1 и ϑ_2 — векторы неизвестных параметров, переставленные соответствующим образом:

$$\vartheta_1 = [\theta_1 \quad \theta_2]^T, \tag{10}$$

$$\theta_2 = [\theta_3 \quad \theta_4 \quad \theta_5 \quad \theta_6]^T, \tag{11}$$

$$\theta_3 = [\theta_7 \quad \theta_8 \quad \theta_9 \quad \theta_{10}]^T. \tag{12}$$

Для расширения регрессоров $\varphi_1^T(v,\dot{v}), \varphi_2^T(v,\dot{v})$ и $\varphi_3^T(v,\dot{v})$ воспользуемся устойчивыми фильтрами и введем три оператора задержки d_i $i=\overline{1,3}$.

Применим операторы задержки к сигналам

$$\varphi_{1i}^{T}(t) = \varphi_{1}^{T}(t - d_{i}), \tau_{1i}(t) = \tau_{1}(t - d_{i}), i = \overline{1,2},$$

$$\varphi_{2i}^{T}(t) = \varphi_{2}^{T}(t - d_{j}), \tau_{2i}(t) = \tau_{2}(t - d_{i}), i = \overline{1,3},$$

$$\varphi_{3i}^{T}(t) = \varphi_{3}^{T}(t - d_{j}), \tau_{3i}(t) = \tau_{3}(t - d_{i}), i = \overline{1,3}.$$

и получим расширенные регрессионные модели.

$$\vartheta_1 = T_1(t),$$

$$\Phi_2(t)\vartheta_2 = T_2(t),$$

$$\Phi_3(t)\vartheta_3 = T_3(t),$$

где

$$\begin{split} \Phi_{1}(t) &= \begin{bmatrix} \varphi_{1}^{T}(t) \\ \varphi_{11}^{T}(t) \end{bmatrix}, T_{1}(t) = \begin{bmatrix} \tau_{1}^{T}(t) \\ \tau_{11}^{T}(t) \end{bmatrix}, \\ \Phi_{2}(t) &= \begin{bmatrix} \varphi_{2}^{T}(t) \\ \varphi_{21}^{T}(t) \\ \varphi_{22}^{T}(t) \\ \varphi_{23}^{T}(t) \end{bmatrix}, T_{2}(t) &= \begin{bmatrix} \tau_{2}^{T}(t) \\ \tau_{21}^{T}(t) \\ \tau_{21}^{T}(t) \\ \tau_{22}^{T}(t) \end{bmatrix}, \\ \Phi_{3}(t) &= \begin{bmatrix} \varphi_{3}^{T}(t) \\ \varphi_{31}^{T}(t) \\ \varphi_{32}^{T}(t) \\ \varphi_{33}^{T}(t) \end{bmatrix}, T_{3}(t) &= \begin{bmatrix} \tau_{3}^{T}(t) \\ \tau_{31}^{T}(t) \\ \tau_{32}^{T}(t) \\ \tau_{33}^{T}(t) \end{bmatrix}. \end{split}$$

Для упрощения записи введем следующие определения

$$\bar{\varphi}_1(t) = det\{\Phi_1\}(t), \bar{T}_1(t) = adj\{\Phi_1(t)\}T_1(t), \\ \bar{\varphi}_2(t) = det\{\Phi_2\}(t), \bar{T}_2(t) = adj\{\Phi_2(t)\}T_2(t), \\ \bar{\varphi}_3(t) = det\{\Phi_3\}(t), \bar{T}_3(t) = adj\{\Phi_3(t)\}T_3(t).$$

Теперь мы можем применить закон обновления оценок $\hat{\vartheta}_1$, $\hat{\vartheta}_2$ и $\hat{\vartheta}_3$ векторов ϑ_1 , ϑ_2 и ϑ_3 соответственно. Получим алгоритм оценивания на основе расширенных регрессоров

$$\hat{\vartheta}_{1} = \gamma_{1}\bar{\varphi}_{1}(t)(\bar{T}_{1}(t) - \bar{\varphi}_{1}(t)\hat{\vartheta}_{1}),
\hat{\vartheta}_{2} = \gamma_{2}\bar{\varphi}_{2}(t)(\bar{T}_{2}(t) - \bar{\varphi}_{2}(t)\hat{\vartheta}_{2}),
\hat{\vartheta}_{3} = \gamma_{3}\bar{\varphi}_{3}(t)(\bar{T}_{3}(t) - \bar{\varphi}_{3}(t)\hat{\vartheta}_{3}),$$
(13)

где γ_1, γ_2 и $\gamma_3 > 0$ — расчётные параметры, влияющие на скорость сходимости процесса оценки.

Оценку $\hat{\theta}$ можно получить из $\hat{\vartheta}_1,\hat{\vartheta}_2$ и $\hat{\vartheta}_3,$ используя (10), (11) и (12).

Полученные оценки могут быть использованы для настройки коэффициентов адаптивного регулятора на базе обратной задачи динамики для модели надводного судна (1) с целью достижения цели (6). Учитывая определение обратной задачи динамики, выберем номинальный закон управления для объекта (1) следующего вида:

$$\tau = M(M^{-1}Dv - K_p \eta - K_d v_e + \dot{v}_r, \tag{14}$$

где K_p и K_d — диагональные положительно определенные матрицы пропорционального и производного коэффициентов соответственно. Этот подход может быть применен для удержания и слежения за станцией при отсутствии возмущений и при известности всех параметров.

Заменим номинальный закон управления на адаптивную версию, основанную на оценках $\hat{\theta}$ вектора θ

$$\tau = \widehat{M}(\widehat{M} - \widehat{D}v - K_p \eta - K_d v_e + \dot{v}_r), \tag{15}$$

где матрицы \widehat{M} , \widehat{D} имеют вид

$$\widehat{M} = \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_1 & 0 & 0 \\ 0 & \widehat{\theta}_2 & \widehat{\theta}_3 \\ 0 & \widehat{\theta}_4 & \widehat{\theta}_5 \end{bmatrix}, \widehat{D} = \begin{bmatrix} \widehat{\theta}_6 & 0 & 0 \\ 0 & \widehat{\theta}_7 & \widehat{\theta}_8 \\ 0 & \widehat{\theta}_9 & \widehat{\theta}_{10} \end{bmatrix},$$

и оценки $\hat{\theta}_i$, $i=\overline{1,10}$ получены на выходе одного из алгоритмов (8), (9) или (13).

Для анализа устойчивости замкнутой системы применим адаптивное управление (15) к объекту (1) и получим модель

$$\widehat{M}(q)(\dot{\widetilde{v}} + K_d\widetilde{v} + K_p\widetilde{\eta}) = \phi^{\mathrm{T}}(\eta, \nu, \dot{\nu})\widetilde{\theta},$$

которую можно представить в векторно-матричном виде

$$\dot{\xi} = A\xi + B\widehat{M}^{-1}(\eta)\phi^{\mathrm{T}}(\eta, \nu, \dot{\nu})\widetilde{\theta},$$

где

$$\xi = \begin{bmatrix} \widetilde{\eta} \\ \widetilde{y} \end{bmatrix}$$
, $A = \begin{bmatrix} O_2 & I_2 \\ -K_n & -K_d \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} O_2 \\ I_2 \end{bmatrix}$,

где O_2 – нулевая матрица размерности 2x2, I_2 – единичная матрица размерности 2x2.

Так как матрицу A можно сделать гурвицевой с помощью соответствующего выбора $K_p>0$ и $K_d>0$, то существует положительно-определённая симметричная матрица P, удовлетворяющая следующему условию:

$$A^{T}P + PA = -Q, Q = Q^{T} > 0.$$

Выберем функцию Ляпунова вида:

$$V = \xi^T P \xi.$$

дифференцируя которую вдоль траектории системы, получим

$$\dot{V} = -\xi^{T}(A^{T}P + PA)\xi + 2\xi^{T}PB\widehat{M}^{-1}(\eta)\phi^{T}(\eta,\nu,\dot{\nu})\widetilde{\theta} =$$

$$= -\xi^{T}Q\xi + 2\xi^{T}PB\widehat{M}^{-1}(\eta)\phi^{T}(\eta,\nu,\dot{\nu})\widetilde{\theta},$$

где если первая цель (5) достигнута и $\tilde{\theta} \to 0$, то при $t \to \infty$ мы получаем $\dot{V} \to -\xi^T P \xi$, что доказывает выполнение второй цели (6).

Рассмотрим результаты компьютерного моделирования системы непрямого адаптивного управления моделью надводного судна (1). Параметры модели надводного судна (1), содержащиеся в матрицах M и D приведены в таблице.

Параметры модели надводного корабля

Таблица

Параметр	Величина	Параметр	Величина
$ heta_1$	3	θ_6	1.0
$ heta_2$	1	θ_7	-0.5
θ_3	2	θ_8	1.0
$ heta_4$	-0.5	θ_9	1.0
$ heta_5$	1	θ_{10}	1.0

В качестве задающей траектории заданы гармонические сигналы со смещением. Во избежание сингулярности в матрице M^{-1} , зададим начальные условия на интеграторах алгоритмов оценивания параметров как

$$\hat{\theta}(0) = [1 \quad 1 \quad 1 \quad -2 \quad 0 \quad 0 \quad -2 \quad 1 \quad 0 \quad 0],$$

настроечные параметры для алгоритма (9) заданы как $\beta=1$ и $k_0=1$. Для алгоритма (13) — $d_1=0.1$, $d_2=0.2$, $d_3=0.3$ и $\gamma_1=\gamma_2=\gamma_3=100$, матрицы коэффициентов усиления в (15) задаются как $K_p=diag(100,100,100)$, $K_d=diag(300,300,300)$.

Результаты моделирования представлены на рис. (1–3). Как видно из графиков, наиболее приемлемые результаты получены при использовании алгоритмов на основе расширенного фильтра Калмана и динамического расширения регрессора. В последнем случае наблюдается монотонность процесса оценивания и, как следствие, меньшая колебательность процесса управления.

В работе предложен алгоритм адаптивного управления динамически позиционируемыми надводным судном. Были изучены три метода оценки параметров: метод градиентного спуска, расширенный фильтр Калмана и динамическое расширение регрессора. Результаты проиллюстрированы с помощью компьютерного моделирования. Дальнейшее развитие работы предполагает рассмотрение нелинейной модели надводного судна с учетом внешних возмущений, а также проведение экспериментальных исследований с использованием масштабной функциональной модели надводного судна в условиях приближенных к реальным при помощи лабораторного стенда.

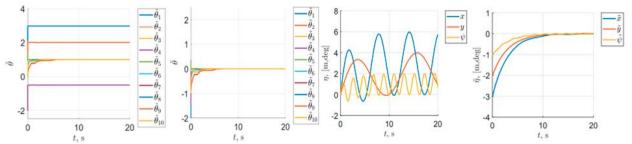


Рис. 1. Результаты моделирования оценки параметров и адаптивного управления методом градиентного спуска

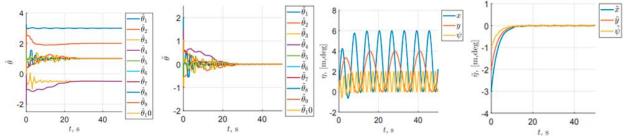


Рис. 2. Результаты моделирования оценки параметров и адаптивного управления методом ЕКГ

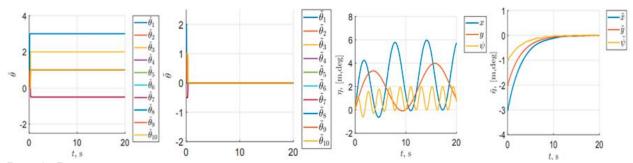


Рис. 3. Результаты моделирования оценки параметров и адаптивного управления методом DREM

Список использованных источников

- 1. Wang J., Borisov O., Gromov V., Pyrkin A., Bobtsov A. Adaptive controller implementation for surface robotic vessel // Chinese Control Conference. 2015. V. 2015. Pp. 3230–3235.
- 2. Tzeng C.-Y., Chen J.-F. Fundamental properties of linear ship steering dynamic models // Journal of Marine Science and Technology. 2009. V. 7. Pp. 79–88.
- 3. Fossen T.I., Sagatun S.I., Sørensen A.J. Identification of Dynamically Positioned Ships // Modeling, Identification and Control. 1996. V. 17. Pp. 153–165.
- 4. Aranovskiy S., Bobtsov A., Ortega R., Pyrkin A. Parameters estimation via dynamic regressor extension and mixing // Proceedings of the American Control Conference. 2016. V. 2016. Pp. 6971–6976.
- 5. Nguyen K.T., Vlasov S., Skobeleva A. Mathematical modeling and identification of surface vessel model parameters // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics 2021 V. 21. Pp. 418–425.

УДК 004.89

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КОНТЕНТА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПРЕЗЕНТАЦИЙ

Власенко Н.А.¹ (студент) Научный руководитель – к.т.н. Русак А.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: nt.vlasenko@yandex.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В работе представлены исследование и анализ существующих экстрактивных и абстрактивных методов суммаризации русскоязычных текстов и генерации слайдов презентаций. Полученные результаты используются для дообучения модели на собранных датасетах.

Ключевые слова

Суммаризация текста, глубокое обучение, NLP, LLM, нейронная сеть.

В современном информационном обществе все большую важность приобретает умение представлять информацию в понятной и увлекательной форме. Создание презентаций стало неотъемлемой частью деловой и профессиональной деятельности, особенно в области научных исследований, образования и представления комплексных и объемных документов. С течением времени появились инструменты, такие как Microsoft PowerPoint и Google Slides, которые помогают создавать презентации вручную. Однако, при работе с достаточно объемными документами, такими как научные статьи, дипломы, главы книг, создание презентаций может быть трудоемким и затратным процессом.

Исследования в области обработки естественного языка прогрессируют с каждым годом, однако все ещё существуют проблемы с обработкой русского языка ввиду меньшего количества исследований и отсутствия подходящих наборов данных. Отдельная сложная задача связана с ограничением на длину контекста у языковых моделей. Таким образом, актуально исследование методов суммаризации больших русскоязычных текстов и подходов к генерированию презентаций на основе текстовых документов. Исследование выполнено в рамках проекта НИРМА № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

Создание презентаций зачастую является творческим процессом, требующий задействовать аналитические навыки для выделения главных мыслей и передачи их в сжатой и визуально приятной форме. Рассмотрим шаги, связанные с созданием презентационных слайдов на основе документа:

- 1) определить тематику презентации и целевую аудиторию,
- 2) определить основные разделы и компоненты,
- 3) определить структуру контента и его расположение на слайде,
- 4) суммаризировать текст,
- 5) извлечь формулы,
- 6) извлечь рисунки
- 7) расположить все на слайде в соответствии со структурой,
- 8) применить уникальный стиль.

Для решения этих задач используются алгоритмы целочисленного линейного программирования (ILP), RoBERTa для кодировки предложений и bidirectional GRU для извлечения эмбеддингов текста, для извлечения эмбеддингов изображений используется ResNet-152 [1], а также для парсинга документов используется Stanford parser и разделение

предложений на характерные для английского языка словосочетания с глаголами или с существительными [2, 3].

Для решения задачи генерации слайдов Yue Hu и Xiaojun Wan [4] предлагают новую систему под названием PPSGen, что является эталонным решением. Сначала она использует метод регрессии на основе SVR, чтобы узнать оценки важности предложений в академической статье, а затем использует метод целочисленного линейного программирования (ILP) для создания структурированных слайдов путем выбора и выравнивания ключевых фраз и предложений. Результаты оценки тестового набора из 200 тестовых пар документов и слайдов, собранных в Интернете, демонстрируют, что предлагаемая нами система PPSGen может генерировать слайды с лучшим качеством, чем аналогичные методы, представленные в то время (rouge 1 = 0.41342, rouge 2= 0.13067, rouge SU4 = 0.17502).

Исследователи Microsoft Tsu-Jui Fu, William Yang Wang, Daniel McDuff, Yale Song [5] используют подход, решающий несколько задач в области визуализации и языка, например, визуально-семантическое встраивание и мультимодальное обобщение. Предложенный метод включает такие модули как Document Reader (DR) кодирует предложения и цифры в документе, Progress Tracker (PT) контролирует указатели на входные данные (т.е. какой раздел в данный момент обрабатывается) и выходные данные (т.е. какой слайд в данный момент генерируется) и определяет, когда переходить к следующему разделу/слайду, основываясь на достигнутом прогрессе, Object Placer (OP) определяет, какой объект из текущего раздела (предложение или рисунок) поместить на текущий слайд. Он также предсказывает местоположение и размер каждого объекта, который будет размещен на слайде, Paraphraser (PAR) берет выбранное предложение и переписывает его в сжатой форме, прежде чем поместить на слайд.

Для проведения исследований были выбраны несколько наборов данных. Собран корпус дипломных работ студентов ИТМО за 2022 и 2023 года. Данный набор данных включал в себя текст дипломной работы (text), название института/факультета (institute), уровень образования магистр/бакалавр (lvl), год написания работы (year). Размер полученного корпуса 4204 документов, коэффициент асимметрии = 3.72, правый хвост распределения немного длиннее левого и количество дипломов, в которых количество слов больше 10000 больше, коэффициент вариации или эксцесс = 30.33%, изменчивость вариационного ряда относится к высокой. Стандартный корпус с автоматическим обобщением новостей GusevGazeta: размер корпуса - 60 000, средняя длина текста - 903 слов, средняя длина абстракта – 41 слово. Тексты научных статей на английском языке TitleAbstractSummaryDatasets: размер корпуса текстов ~221 тыс. документов, размер словаря ~48 тыс. слов. И этот же набор, переведенный на русский язык: размер словаря ~81 тыс. слов.

Было проведено сравнение методов суммаризации и подготовки данных, таких как TextRank, который позволяет построить граф по тексту и извлечь ключевые слова и связи, извлечения эмбеддингов с помощью Summa и Navec из проекта Natasha, а также жадная oracle суммаризация в тандеме с рекуррентной нейронной сетью SummaRuNNer [6], трансформер mBART (Multilingual Bidirectional Auto-regressive Transformer), предобученный на русском датасете и новая генеративная модель Gigachat от Сбера, основанная на ruGPT-3.5.

В данной работе были реализованы алгоритмы и подходы к суммаризации объемных русских текстов из разных датасетов, акцент делался на научные статьи и дипломные работы на разные темы. Лучших результатов удалось достигнуть с помощью жадного oracle summary и рекуррентной модели SummaRuNNer для экстрактивной суммаризации документов на основе GRU по метрикам качества BLEU и ROUGE-1, ROUGE-2 и ROUGE-L (таблица).

Таблица Алгоритмы и подходы к суммаризации объемных русских текстов из разных датасетов

	- 1 1 - 3			1.3		
Датасет/Метод	TextRank	Navec	Summa	SummaRuNNer	MBart	Gigachat
GusevGazeta	0.35	0.27	0.28	0.45	0.17	0.16
CSTASD	0.19	0.39	0.40	0.45	0.12	0.09
CSTASD	0.10	0.33	0.34	0.39	0.16	0.22
(на русском)	0.10	0.55	0.34	0.34	0.10	0.22

Список использованных источников

- 1. Fu T.-J., Wang W.Y., McDuff D., Song Y. DOC2PPT: Automatic Presentation Slides Generation from Scientific Documents //Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2022. №. 36(1). Pp. 634–642. DOI: 10.1609/aaai.v36i1.19943.
- 2. Wang S., Wan X., Du S. Phrase-Based Presentation Slides Generation for Academic Papers // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2017. №. 31(1). DOI: 10.1609/aaai.v31i1.10481.
- 3. Sefid A., Wu J., Mitra P., Giles C.L. Automatic Slide Generation for Scientific Papers // CEUR Workshop Proceedings. − 2019. − №. 2526. − Pp. 11–16.
- 4. Hu Y., Wan X. PPSGen: Learning-Based Presentation Slides Generation for Academic Papers // IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering. 2015. №. 27(4). Pp. 1085–1097. DOI: 10.1109/TKDE.2014.2359652.
- 5. Fu T.-J., Wang W.Y., McDuff D., Song Y. DOC2PPT: Automatic Presentation Slides Generation from Scientific Documents. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2022. №. 36(1). Pp. 634–642. https://doi.org/10.1609/aaai.v36i1.19943.
- 6. Nallapati R., Zhai F., Zhou B. SummaRuNNer: A Recurrent Neural Network Based Sequence Model for Extractive Summarization of Documents. // AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2016. DOI: 10.1609/aaai.v31i1.10958.

УДК 65.011.56

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ И ТЕНДЕНЦИЙ В СФЕРЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕВАТОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

Волобуев И.К.¹ (аспирант) Научный руководитель – д.пед.н., профессор Готская И.Б.¹

1 – Университет ИТМО

email: riko3144@gmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИР «Автоматизация процессов ведения учётной информации на предприятиях агропромышленного комплекса».

В работе рассматривается проблематика процессов сферы элеваторных предприятий, а также модель на данный момент их теоретического решения путём оптимизации и автоматизации составляющих этих процессов. В статье также представлен материал, полученный в результате интервьюирования рабочего персонала нескольких предприятий, что позволило выявить специфику предметной области для более точной разработки модели и её дальнейшей программной реализации.

Ключевые слова

Элеватор, бизнес-процесс, MES-система, ERP-система, автоматизация.

Исследование концентрируется на бизнес-процессах, которые протекают на элеваторных предприятиях — тип агропромышленных предприятий, специализирующихся на подработке от зерновых и сорных примесей, лабораторному анализу качественных показателей и хранении зерновых культур.

Элеваторные предприятия подразделяются по технологическим особенностям на следующие категории:

- заготовительные элеваторные предприятия, базы которых специализируются на приёмке и хранении пшеничных зерновых культур, использующихся в производстве хлебобулочных изделий;
- базисные элеваторные предприятия, предназначенные для хранения оперативных запасов зерновых продуктов;
- фондовые элеваторные предприятия, база которых включает в себя зернохранилища с возможностями длительного хранения и объёмом до 300 тыс. тонн;
- линейные элеваторные предприятия, с возможностями приёмки партий с железнодорожных и автомобильных путей;
- производственные элеваторные предприятия, работающие совместно с местом переработки зернового урожая в готовый продукт;
- портовые элеваторные предприятия, обладающие возможностями приёмки и отпуска зерновых культур на грузовые суда [1].

На данном этапе исследования была поставлена цель методами наблюдения и сравнения составить техническую карту процессов на элеваторных предприятиях и выделить ключевые в них проблемы, которые можно устранить путём цифровизации определённых этапов. Собранная информация будет основой для проектирования модели автоматизация и внедрения разработанного решения в процессы предприятия. Было посещено несколько элеваторных предприятий, находящихся в Центральном федеральном округе. Во время визита было в том числе взято интервью у рабочего персонала предприятия, и на его основе составлена технологическая карта процессов. На рисунке 1 представлена схема приёмки грузов на базе элеватора от подразделения к подразделению [2].

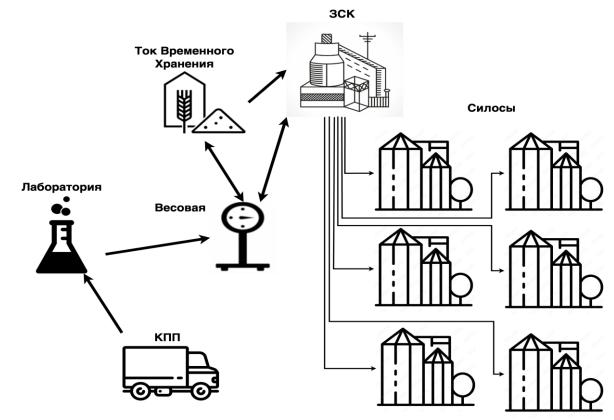


Рис. 1. Технологическая карта процессов приёмки [2]

Процесс приёмки начинается на КПП, куда прибывает транспорт с партией груза зерновой культуры от заказчика услуг элеватора. Пройдя этап сверки документов, из груза изымается проба массой до двух килограмм для последующего лабораторного анализа качественных показателей культуры. Транспорт далее отправляется в весовую для определения массы брутто — массы транспорта и зерна. После, если на данный момент зерносушильный комплекс не занят подработкой другой зерновой культуры, то груз заказчика выгружается сразу в бункерах ЗСК, откуда сразу отправляется на подработку [3]. В противном случае зерно выгружается в токе временного хранения, а транспорт вновь возвращается в весовую для получения массы тары — массы транспорта без груза. Разница между массами брутто и тары даёт в качестве результата массу нетто — вес самой партии. Результаты лабораторного анализа и показатели масс в последствии используется для расчёта необходимого объёма подработки партии зерна заказчика. Грузовой транспорт сторонней фирмы после повторного взвешивания покидает базу элеватора. Зерновая культура после очищения от сорных и зерновых примесей и сушки в ЗСК отправляется на хранения в силосы.

Исходя из вышеописанного процесса приёмки партии груза, можно выделить основные проблемы, с которыми на сегодняшний день сталкиваются элеваторные предприятия. Для процесса приёмки на уровне внутренней документации задекларирована норма выполнения за 20 минут в условиях элеваторной базы, включающей в себя по одному подразделению КПП, лаборатории, весовой, тока временного хранения и ЗСК. То есть такой элеватор за восьмичасовой рабочий день должен успеть обслужить 160 грузовых машин при условии их постоянного потока. Однако приёмка одного грузового транспорта может занимать до 60 минут. Это связано в том числе с тем, что расположение подразделений на базе элеватора не является универсальным, а стороннему водителю необходимо как-то ориентироваться чтобы понимать куда и как необходимо подъезжать. Помимо этого, управляющий персонал не имеет возможностей дистанционно организовать водителей, отдавая команды каждому из них, например, когда ему подъезжать на весовую, или выгружаться в току или в ЗСК.

Второй важной проблемой является содержание на базе элеватора в оптимальном количестве рабочего персонала. Нагрузка на элеваторные предприятия напрямую зависит от

периода сбора урожая, так как именно в этот период перед потенциальным заказчиком услуг стоит задача свой урожай подработать и сохранить для последующей продажи или отпуска в производство. Из этого следует, что в этот период элеватору требуется большое число работников порой даже для тривиальных задач, чтобы процессы выполнялись как можно быстрее и точнее. Но тратить ресурсы на поддержку такого количества человек всё оставшееся вне периода сбора время – контрпродуктивно с точки зрения бизнеса. И помимо этого, результативность процессов остаётся подвержена риску человеческого фактора.

Третьим актуальным вопросом остаётся взаимодействие рабочего персонала на базе элеватора между собой. Для руководства важно своевременное и точное выполнение работником своих инструкций, а также принятие решений во внештатных ситуациях. Предпочтение в обеспечении связи зачастую отдают рациям, но данный вид устройств не всегда способен точно передать сообщение от одного человека другому.

Основываясь на вышеописанных проблемах, была составлена модель автоматизации, продемонстрированная на рисунке 2 в виде пирамиды, в которой функционирование вышестоящего элемента зависит от составляющих элементов нижестоящего.



Рис. 2. Пирамида автоматизации

В основе данной пирамиды лежать контрольно-измерительные приборы и автоматика (КИПиА). В данную категорию включены датчики, термоштанги, термометры, механизмы для охлаждения зерна, вентиляторы и прочие автономные механизмы.

Выше располагаются автоматизированные системы управления технологическим процессом (АСУ ТП) – системы, нацеленные на локальную автоматизацию путём объединения в единую систему ранее упомянутых датчиков и механизмов. Подобные системы уже позволяют значительно снизить влияние человеческого фактора в процессах на предприятии [4].

Ещё выше расположены MES-системы – системы управления техническими процессами. Основные задачи, выполняемые данным программным обеспечением, нацелены на повышение эффективности управления производством и планирование ресурсов [5].

Вершину в рассматриваемой пирамиде занимают ERP-системы – программное обеспечение для ведения учётной информации на предприятиях [6]. Задачи данного типа систем заключаются в представлении пользователю итого результата работы систем, находящихся ниже в пирамиде, в виде данных учёта, на основе которых уже, например, принимаются финансовые решения.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Программная инженерия и компьютерные технологии

Говоря о сегодняшних тенденциях и задачах оптимизации в сфере агропромышленного комплекса и текущем состоянии КИПиА, АСУ ТП, MES и ERP системах, можно обнаружить множество элементов, которые можно заменить более технологически развитой альтернативой. Например, рассмотреть варианты внедрения технологий, основывающихся на машинном обучении, или же разработки предоставляющую более сильную связность между компонентами обеспечивающих функционирование процессов на элеваторных предприятиях.

Список использованных источников:

- 1. Винокуров К.В. Элеваторы, склады, зерносушилки Саратов: СГТУ, 2018. 88 с.
- 2. Платонов П.Н., Пунков С.П., Фасман В.Б. Элеваторы и склады М.: Агропромиздат, 1987. 319 с.
- 3. Трисвятский Л.А., Лесик Б.В., Кудрина В.Н. Хранение и технология сельскохозяйственных продуктов / Под ред. Л.А. Трисвятского М.: Агропромиздат, 1991. 415 с.
- 4. Антонов А.В. Особенности анализа надёжности АСУ ТП и её программного обеспечения // Управление развитием крупномасштабных систем MLSD'2016. 2016. Т. 2. С. 176—183.
- 5. Ицкович Э.Л. Методы комплексной автоматизации производства технологического типа М.: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН, 2013. 295 с.
- 6. Григорьев А.А., Титов В.А. Характеристика, структура, организация систем управления ERP, ERP II, ERP III // Фундаментальные исследования. -2017. -№. 2. C. 48-51.

УДК 004.413

НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Горшков П.В. 1 (аспирант) Научный руководитель — д.т.н., профессор Бессмертный И.А. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: vip@consultagency.ru

В работе рассмотрена актуальность внедрения нового подхода к проектированию программного обеспечения в свете современных требований и вызовов в ІТ-индустрии. Выделяются основные проблемы, с которыми сталкиваются команды разработки, и предлагается новый подход для повышения эффективности управления проектами. Основной упор делается на балансе между качеством продукта, скоростью разработки и оптимизацией затрат.

Ключевые слова

Проектирование, программное обеспечение, управление IT-проектами, эффективность разработки, качество продукта, скорость выполнения, снижение затрат, гибкая разработка, каскадная модель, методологии разработки.

В современном мире, когда технологии меняются очень быстро, эффективность разработки становится одним из важнейших аспектов.

Основная цель научной работы разработать и предложить новую систему управления IT-проектами, которая будет обеспечивать большую эффективность, улучшит качество продукта, повысит скорость выполнения и снизит затраты. С одной стороны, эти три пункта, качество, скорость и стоимость в большинстве случаев являются взаимоисключающими, тем не менее, при соблюдении определённых условий можно добиться улучшения показателей по всем указанным аспектам.

Актуальность работы подтверждается различными исследованиями, статистическими данными и отчётами, согласно которым большая часть стартапов в сфере IT не добиваются значительных успехов [1]. Повышающаяся конкуренция и динамические изменения ведут к сокращению циклов и повышению гибкости разработки. В результате чего появляется необходимость в новых подходах к проектированию, которые будут отвечать возрастающим требованиям к разработке программного обеспечения.

Прежде всего обратим внимание на существующие шаблоны. На самом деле, по большому счёту, среди общеизвестных, всего два базовых шаблона, это каскадная модель разработки и гибкая разработка. И уже на их основе строятся другие подходы, такие как:

- итеративная разработка;
- спиральная модель;
- модель V-образа;
- SCRUM:
- Kanban:
- Extreme Programming (XP);
- и многие другие.

Но всё равно, одни подходы руководствуются принципами каскадной модели, а другие – гибкой.

Безусловно, каждый из подходов имеет свои преимущества, но насколько они подходят для современной разработки?

Про каскадную модель в своё время писал Фредерик Брукс, в книге «Мифический человеко-месяц»: «Планируйте выбросить первую версию — Вам всё равно придётся это сделать» [2]. Но в главе «Двадцать лет», которая была написана примерно через двадцать лет после первого издания, он опровергает свой тезис: «Не разрабатывайте программ на выброс, каскадная модель не верна» [2]. И хотя она имеет место быть в отдельных отраслях, с минимальной конкуренцией и максимальной ответственностью, например, космической, для массовой разработки, действительно, будет проигрывать в скорости и актуальности выпускаемого продукта.

Именно тут и должен приходить на помощь Agile, позволяющий не разрабатывать программ на выброс, повысить скорость разработки, обеспечить максимальную гибкость [3]. Но при всех, казалось бы, положительных отличительных особенностях есть ряд моментов, которые могут или ограничить положительный эффект от Agile подхода, или сделать его и вовсе не применимым [4].

На самом деле всё заложено в Agile-манифесте, разработанном в 2001 году [3]. Основные ценности которого:

- 1. Люди и их взаимодействие важнее процессов и инструментов.
- 2. Готовый продукт важнее документации по нему.
- 3. Сотрудничество с заказчиком важнее жестких контрактных ограничений.
- 4. Реакция на изменения важнее следования плану.

Гибкий подход требует активного участия заказчика. Притом клиент должен уметь взаимодействовать с исполнителем, зачастую это требует дополнительного обучения. А всегда ли заказчик готов выделять дополнительное время, силы и ресурсы, чтобы взаимодействовать с исполнителем? А если, например, использовать SCRAM (на него приходится больше половины всех команд разработчиков, работающих в рамках Agile), то помимо так называемого владельца продукта (Product ownera) необходим SCRUM мастер [5]. И психология клиента, далёкого от методологий и их принципов, в том, что зачем нанимать на зарплату непонятно кого, когда лучше нанять ещё одного программиста.

Следующий момент заключается в том, что гибкие методологии требуют большего профессионализма и ответственности со стороны команды разработчиков. Помимо само организованности и размытых обязанностей необходимо из пользовательских историй определять требования, которые в последствии будут реализованы. А каждый ли заказчик может определить уровень команды, особенно на начальных этапах?

Недостаточная документация затрудняет дальнейшую поддержку. А, если к команде присоединятся новые члены, большая вероятность возникновения сложностей с изучением проекта. И это, если не брать во внимание возможные конфликтные ситуации, при которых придётся искать новых исполнителей, и может случиться так, что делать с нуля будет проще и дешевле. А затраченные время и деньги спишутся лишь в полученный опыт.

Очень важным моментом является отсутствие точно определённых сроков и объёма работ. В большинстве случаев это действительно закономерно, далеко не всегда заказчик изначально знает всё, что хочет реализовать. Но, при этом, хочет чётко знать сроки и стоимость.

Стоит упомянуть и такие моменты, как высокий уровень непредсказуемости, повышенный риск того, что будет создаваться не то, что задумывалось. Постоянное взаимодействие между участниками требует больше времени и энергии, затрачиваемого на разработку. Размытые границы и вовсе могут привести к тому, что создание продукта станет бесконечным. В некоторых случаях это может быть обосновано, но далеко не всегда.

Необходимо отметить, что есть ситуации, в которых Agile подход является очень хорошим решением. Так же, как и каскадная модель, и даже в большей степени, он применим при разработке программного обеспечения. Но всё равно имеют место быть описанные моменты, от которых следует избавляться, или, хотя бы, минимизировать.

В качестве решения предлагается новый подход к проектированию программного обеспечения, задача которого взять лучшее, что есть в существующих практиках, отсечь всё лишнее и максимально упростить внедрение и использование.

Основные методы и инструменты

Итеративный подход. Разработка разбивается на короткие циклы (итерации) длительностью от одной недели до двух месяцев, в среднем 2—4 недели, в конце каждой итерации должен быть представлен готовый к работе, протестированный функционал. Каждая итерация включает в себя определение требований, проектирование, реализацию, тестирование и внедрение.

Оптимизированное взаимодействие. Минимизация количества формальных встреч, встречи с заказчиком исключительно в начале (для планирования), и в конце (для сдачи) итерации. При непрерывной работе эти две встречи могут быть объединены в одну. Взаимодействие внутри команды разработчиков может варьироваться в зависимости от компетенций. Если работа одного члена команды (или части команды) зависит от работы другого члена команды (части команды), необходимо посредством удобных средств коммуникации обеспечить согласованность для недопущения простаивания и задержек.

Упрощенная документация. Вместо привычных для Agile методологий «пользовательских историй» следует использовать более формальное определение задач, с указанием, например, классов данных, диаграмм активностей, приёмочных требований. Часто, особенно в рамках каскадной модели, для этого используется язык UML, но для большинства задач он избыточный, и некоторое упрощение может сделать его более доступным. Важным моментом тут будут готовые унифицированные шаблоны, с одной стороны понятные заказчику, с другой стороны, достаточные для программистов, чтобы однозначно понять, что надо разрабатывать и на что обращать внимание при тестировании.

Вспомогательные инструменты. Одним из главных инструментов для работы может являться Капban-доска, куда будут выноситься формализованные задачи, ставиться отметки о реализации, прохождении тестирования, приёмки и так далее. Капban доска должна иметь минимум 5 столбцов, это Бэклог продукта (допускается формат заметок и пользовательских историй), Бэклог итерации (конкретно поставленные задачи с четкими критериями), Выполняемые задачи, Выполненные задачи и Принятые задачи. Ещё важным моментом является использование списка заметок, к которым относятся некритичные ошибки, мелкие исправления, улучшения и так далее. Заводить отдельные карточки под них не удобно, но и упускать из виду тоже нельзя.

База знаний. Она должна упростить вливание в команду новых разработчиков и обеспечить возможность поддержки продукта. В ней фиксируются ключевые решения, архитектурные особенности, содержатся обязательные инструкции, необходимые ссылки, могут быть готовые части кода или команды.

Для упрощения внедрения и перехода на новый подход может быть разработан унифицированный договор с описанием формата взаимодействия, определением MVP (минимального жизнеспособного продукта) и сроков его реализации.

По-отдельности большинство из предложенного может встречаться в той или иной методологии, но особенность именно в объединении. И это может рассматриваться как новый способ применения данных принципов, позволяющий комбинировать лучшие практики из различных подходов в единый, оптимизированный процесс разработки.

Данный подход был апробирован в разных ситуациях:

- я внедрил его в сформированную команду разработчиков, внутри которой сам работал;
- я выступал в качестве единственного исполнителя, и внедрил данный шаблон для взаимодействия с заказчиком;
- я сам выступал заказчиком, и внедрил его для взаимодействия с исполнителями;
- и даже самостоятельно делая проект для себя так же структурировал его с помощью данного шаблона.
 - В результате было создано несколько продуктов. И можно отметить следующее:
- 1. Комфортное взаимодействие между всеми участниками процесса.
- 2. Экономия времени и энергии на формальные встречи.

3. Отсутствие необходимости в самостоятельной интерпретации разработчиками пользовательских историй и самоорганизации команды. Например, когда делали один из продуктов под заказ, клиент не горел желанием быть на связи, а также хотел чётко прописать сроки и стоимость. Предложенная модель его полностью удовлетворила (с учётом прописанных в договоре сроках и объёмах MVP).

После тестового периода и исправления незначительных багов практически полное или вовсе полное отсутствие ошибок, при всех описанных выше ситуациях. Один из проектов со сложным Back-Endom за год работы после сдачи не выдал ни одной ошибки. Другие проекты, если и выдавали ошибки, то только не критические, не затрагивающие основной функционал.

Отдельно стоит отметить производительность готового продукта. Описанные далее цифры скорее уникальные, и далеко не всегда получилось бы достичь таких результатов, тем не менее. Изначально, до внедрения нового шаблона, командой разработчиков был написан модуль, содержащий базу данных, в которой была одна таблица на 29 460 строк, среднее время выполнение операции с данными составляло 1,4 минуты (84 секунды).

Этот результат категорически не устраивал, и после внедрения нового подхода, модуль был полностью переписан. У нового модуля база данных была существенно больше и состояла из нескольких таблиц. Размер среднестатистической таблицы в новой базе: около 106 миллионов строк, максимальный размер таблицы в новой базе данных: больше двух миллиардов строк, объём новой базы данных: 109 гигабайт, среднее время выполнения операции стало составлять: 1,64 секунды.

Проведя несложные вычисления, можно заключить, что в результате получилось добиться увеличения скорости выполнения операции с данными более, чем в 140 тысяч раз, то есть выполнение операции, которая заняла в среднем 1,64 секунды, изначальным решением заняла бы более двух дней шестнадцати часов.

Таким образом, учитывая полученные первичные результаты, можно заключить, что в ряде ситуаций, при работе относительно небольшими командами, предлагаемый подход к проектированию программного обеспечения может обеспечить большую эффективность, улучшить качество продукта, повысить скорость выполнения и снизить затраты.

Список использованных источников

- 1. Jim Johnson. CHAOS Report: Beyond Infinity. The Standish Group. 2020. 260 c.
- 2. Брукс Ф. Мифический человеко-месяц, или как создаются программные системы. СПб.: Питер. 2021.-368 с.
- 3. Вольфсон Б. Гибкое управление проектами и продуктами. СПб.: Питер. 2021. 144 с.
- 4. Главные недостатки Agile // TOCPEOPLE. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://tocpeople.com/2021/02/glavnye-nedostatki-agile/ (дата обращения: 04.02.2024).
- 5. Сазерленд Д. Scrum. Революционный метод управления проектами. М.: Манн, Иванов и Фербер, 2017. 272 с.

УДК 65.011.56

ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЖИЛИЩНОГО ПРОСТРАНСТВА

Зимовин $A.A.^{1}$ Научный руководитель — д.т.н., профессор Платунов $A.E.^{1}$

1 – Университет ИТМО

email: azimovin01@yandex.ru

В данной статье рассматривается подход к использованию искусственного интеллекта в различных областях жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) с целью полноценной автоматизации инженерных сетей жилых объектов. Современные технологии позволяют повысить не только комфорт проживания, но также способствуют повышению надежности функционирования различных бытовых систем, выполняя задачи энергосбережения. В статье особое внимание уделяется важности использования систем автоматизации на объектах, в которых задача энергосбережения является критически важной. Высокая конкуренция в области автоматизации и умных домов необходима в тщательном изучении законодательной базы, а также для регулирования критериев к безопасности, надежности и встраиваемости систем.

Ключевые слова

Автоматизация, искусственный интеллект, энергосбережение, прогнозирование потреблений, энергетические ресурсы, повышение надежности, энергетическое обследование.

В современном мире жизнь каждого человека неразрывно связана с цифровыми технологиями. С появлением первых информационных технологий (ИТ) таких как радио, домашние телефоны, персональные компьютеры и другие жизнь человека становилась все более комфортной. За последние несколько десятилетий и до сегодняшних дней продолжают развиваться ИТ, их внедрение в повседневную жизнь и быт человека. Помимо этого, популярная тенденция использования «чат—ботов» на основе технологии искусственного интеллекта (ИИ) все чаще стала применяться в различных отраслях, таких как обслуживание клиентов, медицина, образование, бизнес и среди людей для общего пользования. Данный скачок роста и развития ИТ привел к созданию современной системы умного дома. Умный дом в понимании современного человека состоит из умных гаджетов, таких как: умные колонки, голосовые ассистенты, умные лампочки, розетки и другое. Однако большое количество людей в действительности не знакомы с пониманием системы «умного» дома, а также не осознают важности использования таких систем.

Первым шагом к появлению системы «умного» дома считается работа американского инженера Эмиля Матиаса в 1950-х годах. В его системе «Push — Button Manor» («Дом с кнопками») было автоматизировано максимальное на то время количество функций: управление воротами, шторами, бытовыми приборами. На проект было потрачено более 2 км проводов, спрятанных в стенах дома, управляющие кнопки находились повсюду внутри дома [1].

По данным онлайн-опроса «М.Видео – Эльдорадо» в 2023 году среди респондентов 18–35 лет, более 89% россиян считают, что набор устройств для организации системы «умного» дома делает жизнь комфортнее и экономит время при решении повседневных бытовых задач. Половина опрошенных (48%) также разделяют мнение, что установка устройств умного дома проста и не требует определенных технических знаний [2].

Система «умного» дома (smart house) — это автоматизированная, интегрируемая система для управления различными домашними процессами с использованием различных технологий. Целью данной системы является повышение комфорта жизни и безопасности,

энергосбережения и управления ресурсами. Наиболее важными критериями качества данной системы являются: автоматизация, удаленное управление, интеграция устройств, энергосбережение, безопасность, ИИ и голосовое управление.

Сама по себе концепция «умного» дома представляет собой управление различными инженерными системами: водоснабжения, отопления, электрическая, газовая, пожарная, охранная, система солнечной энергии. В качестве объектов могут выступать коттеджи и частные дома, квартиры, жилые здания во владении (ЖКХ), а также целые муниципальные здания. В зависимости от объектов также изменяется управление инженерных систем, например, в частных домовладениях: управление тепличными постройками, птичниками и системами безопасности.; в объектах квартирного типа: управление водонагревательных устройств и работа с электричеством. На сегодняшний день использование системы «умного» дома играет роль не только в повышении комфорта жизни человека, но и необходима для полноценного контроля и автоматизации процессов инженерных сетей объекта.

Существующие решения на рынке позволяют автоматизировать большинство процессов бытового хозяйства, однако и существует ряд важных проблем. Предлагаемые решения часто не соответствуют критериям безопасности, энергоэффективности и другим критериям системы «умного дома». В качестве примера можно рассмотреть реальный объект в России, существующий в суровых климатических условиях. Средняя температура может достигать – 30°C. Вопрос энергоэффективности и безопасности в таких условиях является важным. Нештатная ситуация в работе одной из систем объекта может привести к огромному ущербу как в финансов плане, так и невозможностью проживания в данном объекте до устранения всех неисправностей. В случае работы системы теплоснабжения необходимость управления тепловыми ресурсами влияет на энергоэффективность объекта. Тариф на энергетические ресурсы в России зависит от региона и его климатических условий. Работа с системой электроснабжения позволит предотвратить ситуацию обесточивания здания в случае трех фазной системы питания, отказ одной фазы может привести к снижению напряжения в системе в среднем на 30%, перегрузке и нагреву оборудования. При отказе работы системы электроснабжения также нарушается работа других инженерных систем, система отопления перестает функционировать и может полностью выйти из строя, на устранение проблем в которой может уйти несколько месяцев. Использование системы «умного» дома в такой ситуации позволит переключить неисправную фазу на резервную, тем самым предотвратить отказ других инженерных систем, что соответствует критерию повышения безопасности и энергоэффективности.

Стоит отметить, что наибольшее количество потерь энергосбережения связано непосредственно с потребителями энергетических ресурсов, ведущим к проблемам в жилищно-коммунальной сфере. Наибольшие потери теплоэнергии теряются через оконные и дверные проемы, что составляют порядка 70% энергии. Практически во всех объектах, владеющих ЖКХ, отсутствует возможность ручного контроля температурного режима, что вынуждает потребителя энергоресурсов проветривать помещения, тем самым способствовать потере тепла [3].

Также существуют ряд проблем, относящихся к устройствам повышения комфорта, которые на сегодняшний день инженеры пытаются устранять. На большинстве загородных домов проживают животные: собаки, кошки, скот. Системы автоматизации для животных в большинстве случаев не соответствуют критериям безопасности (автоматические кормушки, идентификации животного, лежанки с подогревом). Данные устройства не оснащены необходимыми датчиками для защиты. Так, в случае неисправного кабеля питания, который должен быть изолирован от внешних воздействий, безопасность жизни питомца под угрозой и чревата летальным исходом.

Кроме условий ограниченных ресурсов и климатических условий существуют и другие проблемы. В частности, они связаны с технологическим аспектом систем автоматизации «умного» дома. Дистанционный контроль оборудования осуществляется на основе протоколов Bluetooth и Wi-Fi. Частыми проблемами являются ограниченность диапазона частот, что сказывается на управлении инженерными сетями и контролем оборудования. Необходимо

устанавливать дополнительные роутеры и устройства для возможности управлениям. Схема принципа работы традиционной системы умного дома представлена на рисунке 1.

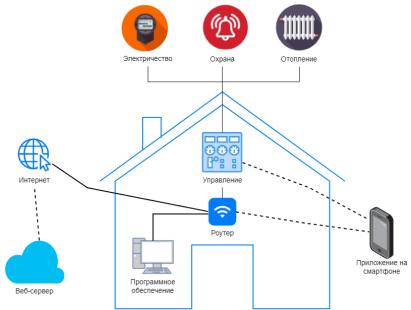


Рис. 1. Схема принципа работы системы «умного» дома

Дополнительными проблемами в системах «умных» домов считается ограниченность функционала при разработке, встраивании устройств и их контроле. На сегодняшний день существует огромное количество организаций, занимающихся разработкой систем «умного» дома и встраиваемой техникой. Основной проблемой является ограниченность стандартов в данной отрасли. Каждая компания разрабатывает конкретное программное обеспечение (ПО) под конкретные устройства, тем самым изолируя системы от других систем «умных» домов. Связка разных систем невозможна из-за различий в работе АРІ, закрытости ПО устройств и ряда других причин. Отсутствие нормативных документов и законов отражается на разработчиках как положительно, так и отрицательно. Их отсутствие может способствовать как разработке инновационных подходов и творческих решений в проектировании систем «умного» дома, так и неограниченные законодательные рамки могут позволить компаниям быстрее внедрять свои продукты на рынок, что может быть важно в сфере быстро развивающихся технологий. Тем не менее малоэффективная проработка требований может сказаться на недостаточном внимании на критериях безопасности и приватности пользователей. Одним из примеров можно привести интеграцию системы видеонаблюдения в систему «умного» дома. Для программной реализации функционала видеонаблюдения необходимо разработать ПО и АРІ для работы с камерами и датчиками через систему «умного» дома, однако время, затрачиваемое на разработку, может растянуться от пары месяцев до нескольких лет, что может сказаться и на финансовых расходах. В частности, эта проблема связана с современной разработкой систем «умного» дома. Производители большинства существующих систем и встраиваемой техники либо не предоставляют в открытом виде ПО и АРІ для модификации системы, либо выдают в ограниченном виде. Необходимость проработки законодательной базы в проектировании систем «умного» дома и устройств интеграции является основной задачей в области встраиваемой техники и интернета – вещей.

Помимо этого, компании «гиганты», существующие на рынке автоматизации, являются монополистами. Начинающие компании не в силах конкурировать с ними в силу того, что лишь одна разработка системы умного дома не является конечной задачей. Как указано выше ограничение в предоставлении ПО и АРІ для работы с встраиваемой техникой приносит дополнительные финансовые и временные трудности в этапе проектирования и разработки системы «умного дома».

На примере разработанного модуля прогнозирования, контроля и управления теплового ресурса объясняется сложность встраивания модулей и решений в существующие системы, важность использования инновационных решений, а также эффект от воздействия использования систем «умного» дома. Для решения задачи потребления теплового ресурса был разработан подход к прогнозированию, контролю и управлению (рис. 2).



Рис. 2. Модель прогнозирования потреблений теплового ресурса в автоматизированной системе планирования, мониторинга и контроля потреблений

Разработанный модуль используется по сегодняшний день в автоматизированной системе контроля, мониторинга и управления процессом обслуживания инженерных сетей зданий [4]. Данный модуль разработан на основе использования библиотек машинного обучения Scikit — Learn. Для построения качественной модели прогнозирования теплового ресурса необходимы данные для обучения. В качестве данных выступают потребления из «Цифровой аналитической системы управления энергетическими ресурсами (СУЭР)» [5]. Данные в указанной автоматизированной системе записываются с 2019 года на реальных объектах муниципального пользования (школы, больницы, администрации и др.). Объем данных составлял более 1 миллиона записей.

Среди данных, полученных из СУЭР, ключевыми считаются технические характеристики зданий, информация о показаниях счетчиков, тарифах и потреблении теплового ресурса. В процессе разработки модуля прогнозирования потреблений были выделены следующие параметры: год постройки здания, общая площадь, количество этажей, наличие утепления фасада здания, количество людей, показание счетчика, средняя наружная температура, средняя температура помещения, тариф на энергетический ресурс, тип крыши, количество окон и т. д. При подготовке данных для обучения, «качественных» строк с данными составило более 500 тысяч записей. Прогнозирование потребления теплового ресурса выполнялось на следующий день после прогноза до следующей недели. Отчет о прогнозировании поступал оператору, закрепленному за конкретным зданием, в последствии регулирующему настройку оборудования, скорректированную согласно прогнозу модуля.

Для построения модели прогнозирования потребления теплового ресурса использовались алгоритмы машинного обучения:

- 1. Метод случайного леса.
- 2. Линейной регрессии.
- 3. Ридж регрессия.

Использование выбранных алгоритмов в ходе разработки модели позволило провести качественный анализ, увеличить коэффициент корреляции между признаками и повысить точность прогноза модели потребления теплового ресурса. В результате разработки модуля

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Программная инженерия и компьютерные технологии

прогнозирования с использованием библиотек машинного обучения, были получены прогнозы на основе данных из СУЭР, представленные в таблице.

Таблица

Результаты исследования

Алгоритм	Точность прогноза, %
RandomForrestRegression	91
LinearRegression	85
Ridge	79

Средняя точность прогноза составила 85%, что считается оптимальным для использования. Разработанный модуль прогнозирования, контроля и мониторинга потребления теплового ресурса функционирует по сегодняшний день.

Сложность встраивания данного модуля в существующие системы «умного» дома заключается в различии между ПО и АРІ, а также в недоступности и недостаточности некоторых данных, в частности показателей за предыдущие месяцы, годы.

В заключение можно сказать, что существующие системы «умного» дома активно развиваются с каждым днем и требуют особого внимания и регулирования со стороны нормативно-правовых документов. Необходимость в дальнейшей разработке законодательной базы остается актуальной. Встраивание таких систем играет важную роль в автоматизации процессов инженерных систем на различных жилых и муниципальных объектах, обеспечении безопасности технологических процессов и безопасности частой собственности, а также в повышении энергоэффективности объекта.

Список использованных источников

- 1. Лобикова О.М., Лобикова Н.В. Проблемы строительства умных домов // Большая Евразия: развитие, безопасность, сотрудничество. 2019. № 2-2. С. 1000–1003.
- 2. Сетевое издание «CNews». [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cnews.ru/news/line/2023-10-18_opros_mvideo-eldorado (дата обращения: 03.01.2024).
- 3. Борисова Н.И., Борисов А.В. К вопросу об энергоресурсосбережении и энергоаудите ЖКХ регионов России в новых экономических условиях // Актуальные проблемы экономики и менеджмента. − 2014. №. 3(3). С. 11–17.
- 4. Зимовин А.А. Использование автоматизированных систем в энергосервисной инфраструктуре для планирования, мониторинга и контроля потреблений // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, посвященная 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова, Белгород, 16–17 мая 2023 года. Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2023. С. 50–54.
- 5. Интеллектуальный подход к энергосбережению. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://eesoft.ru/#rec355686626 (дата обращения: 15.11.2023).

УДК 004.896

МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ОБЛАКОВ ТОЧЕК С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Кальвияйнен Я.О.¹ (студент) Научный руководитель – к.т.н., доцент Быковский С.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: yar.slav.ka@gmail.com

В представленной работе рассмотрены и проанализированы нейросетевые методы решения задачи регистрации облаков точек. Проведено сравнение найденных методов с существующими не нейросетевыми методами и проанализирована возможность использования данных методов во встраиваемых системах.

Ключевые слова

Нейронные сети, облака точек, встраиваемые системы, регистрация облаков точек, рекуррентные нейронные сети (RNN).

Многие современные автономные мобильные платформы, например умные автомобили, или роботы используют датчики — лидары. Они представляют из себя дальномер, делающий измерения по очереди в разных направлениях с известным углом наклона. Данные, собираемые такими датчиками, представляют из себя облако точек. Облако точек — это структура данных, хранящая набор вершин в трехмерной системе координат. Задача регистрации облаков точек появляется в момент, когда датчик начинает перемещаться в пространстве. Например, если он установлен на мобильной платформе или переставляется, чтобы провести сканирование с другого ракурса.

Задача состоит в том, чтобы переложить систему координат одного облака точек в систему координат другого. Существует огромное количество алгоритмов для решения подобной задачи. Они делятся на жесткие и мягкие: первые используются в ситуации, когда у нас есть один и тот же объект без изменений, а вторые – когда объект мог менять свою геометрию, когда нужно совершить аффинное преобразование или когда происходит масштабирование и движение. Однако любой алгоритм объединяет то, что каждый из них итерационный, и чем точнее должен быть необходимый результат, тем дольше будет работать алгоритм. Итеративный алгоритм ближайших точек (ІСР) – это алгоритм регистрации облаков точек, основанный на сведении к минимуму разницы между двумя облаками точек [1]. Второй алгоритм, который рассмотрен в данной работе – это когерентный дрейф точки (СРD), алгоритм, основанный на поиске максимального подобия методом смешанных Гауссовых узлов [2]. Оба алгоритма, как и все не нейросетевые алгоритмы решения данной задачи итеративные, что может создать проблемы при использовании данных алгоритмов в системах, в которых необходима максимальная производительность. Решение данной задачи на встраиваемых системах, соответствуя вышесказанному, актуально, так как возникает при движении, а, соответственно, часто приходится решать данную задачу на различных мобильных платформах. В данной разработанные жёсткие алгоритмы регистрации облаков оптимизированные для выполнения на встраиваемых системах и работающие при условии большого расстояния между системами отсчёта (СО).

Если расстояние между СО велико, тогда некорректно использовать алгоритм ICP, так как он не работает при большом расстоянии между точками без дополнительной одометрии. CPD может быть применен, но, исходя из последующего анализа, алгоритм имеет высокую вычислительную сложность, поэтому можно сфокусироваться на нейросетевых решениях. Так,

например, во многих современных одноплатных компьютерах есть дополнительные ядра для нейросетевых вычислений, поэтому решение через нейронные сети является одним из возможных. Существуют наборы тестовых данных для решения этой задачи [3], но у неё есть следующая проблема: не одинаковый размер входных данных, что не позволяет решить эту задачу полносвязными или сверточными нейронными сетями. По этой причине обеими решениями, описанными в данной статье, являются рекуррентные нейронные сети, в которых в качестве входных данных должны быть облака точек. Так как было определено, что алгоритм регистрации должен быть жестким, в качестве выходных данных должна быть общая на все точки матрица поворота и смещение. Результат регистрации можно увидеть на рисунке 1. Красным цветом отмечено целевое облако точек, а зеленым исходное.

Первое предлагаемое решение этой задачи — это обработка по очереди каждой точки (рис. 2).

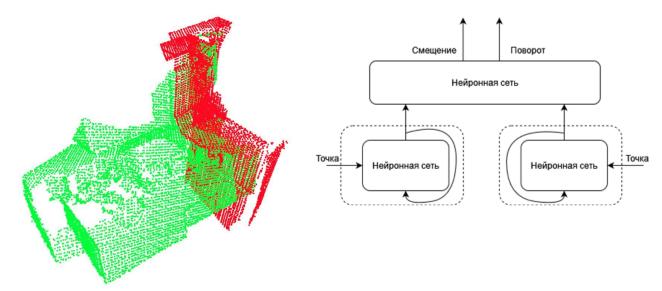


Рис. 1. Пример результата регистрации

Рис. 2. Блок-схема первого решения

Каждая новая точка подаётся в качестве входных данных в одну полносвязную нейронную сеть, и в неё же подаётся вектор, полученный в результате обработки прошлых точек (рис. 3).

Так обрабатывается оба облака точек и полученные признаки подаются на еще одну полносвязную нейронную суть, на выходе из которого получается вектор смещения и матрица поворота (рис. 4).

У такого решения есть проблема: несмотря на небольшое количество параметров, за счет необходимости отдельно обрабатывать каждую точку решение занимает большое количество времени. Первое возможное решение этой проблемы — обрабатывать больше одной точки за раз. В таком случае входными данным для одно шага рекуррентной нейронной сети, будет матрица размера N на 3, где N количество точек в одной группе. Для выделения образов в подобных матрицах используются сверточные нейронные сети. Поэтому в качестве второго решения, облако точек делиться на группы, и каждая группа обрабатывается сверточной нейронной сетью, а затем подается в рекуррентную нейронную сеть (рис. 5).

После внесения изменений меняется только архитектура рекуррентных частей нейронной сети, часть, отвечающая за обработку извлеченных признаков, остается без изменений. В обновленной рекуррентной части, добавляется два одномерных сверточных слоя (рис. 6).

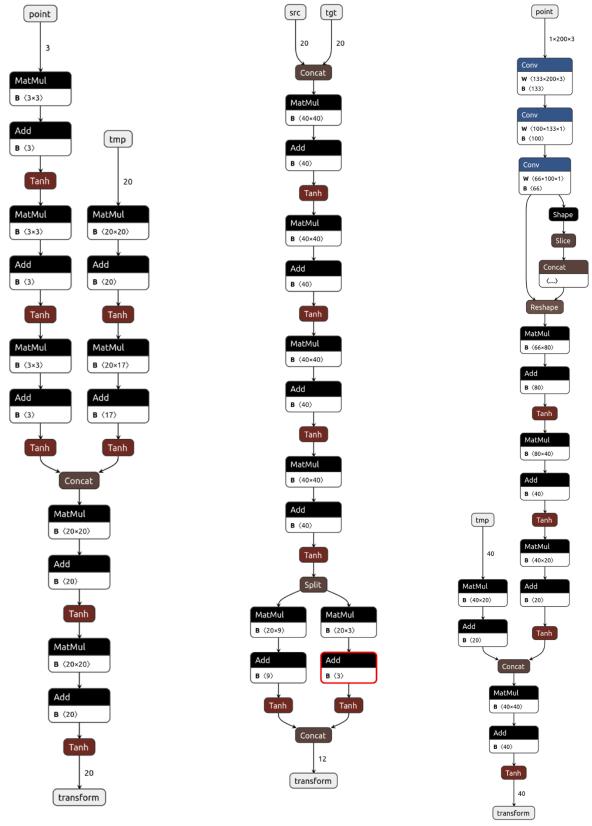
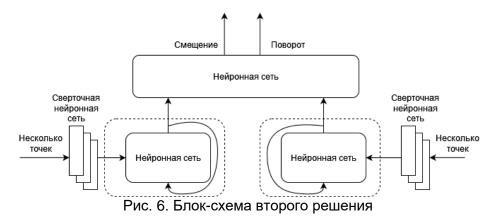


Рис. 3. Архитектура рекуррентной часть нейронной сети

Рис. 4. Архитектура части, обрабатывающий извлеченные признаки

Рис. 5. Архитектура рекуррентной части со сверточной частью



Однако при таком подходе есть значительная проблема, заключающаяся в том, что, если общее количество точек будет не кратно тому, сколько мы обрабатываем за раз, то придется дополнять его другими элементами. К сожалению, это увеличивает объем вычислений, а также может потенциально сказаться на точности.

Обучение нейронных сетей происходило с использованием фреймворка РуТогсh. Для обучения был выбран набор данных 3DMatch (Indoor) [4]. Данный набор данных подходит, так как объем данных не слишком большой, чтобы время обучения также было не слишком большим. Для оптимизации запуска и для возможности быстро адаптировать решения для запуска на одноплатных компьютерах был выбран экспорт готового решения в формат ONNX (Open Neural Network Exchange). Это универсальный формат для экспорта и переноса обученных нейронных сетей на другие платформы. Запуск и тестирование происходили с использованием ускорителя ONNX-Runtime. Экспорт осуществлялся через разделение всей нейронной сети на несколько частей. Это две рекурсивных части и финальная часть, объединяющая извлеченные признаки. Такой способ экспорта связан с тем, что формат ONNX хранит только последовательность преобразований, но не хранит алгоритм вычислений, а значит, в нем невозможно реализовать рекурсивные нейронные сети.

На рисунке 7 представлено визуальное сравнение производительности решений. Очевидно, что временные затраты для различных методов значительно отличаются.

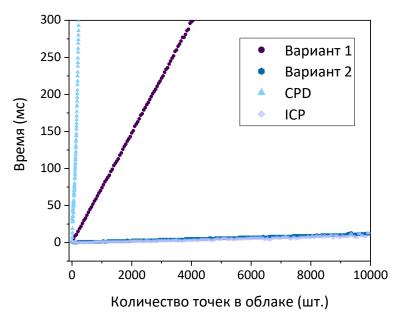


Рис. 7. Сравнение алгоритмов по времени

Вариант 1 значительно медленнее, чем вариант 2, а также решения отличаются в области применения. Вариант 1 более универсален, так как любое количество точек может быть

обработано. Второе же будет эффективнее для тех типов сканеров, которые сканируют точки группами. Оба подхода позволяют распараллелить решение задачи регистрации и сам процесс сканирования, но выбор конкретного решения зависит от условий вычисления. При сканировании группами эффективно будет обучить нейронную сеть как в варианте 2, принимая на вход группу по тому размеру, как и размер сканирования, и извлекать признаки по ходу самого сканирования, а если датчик возвращает результат сканирования целым облаком, то может быть использовано первое решение. Также использование на реальном датчике имеет преимущество, так как решает проблему нормализации данных. Это связано с тем, что у датчиков есть максимальное расстояние, которое фиксирует дальномер лидара, поэтому данные изначально можно считать нормализованными.

Сравним теперь нейросетевые алгоритмы с итерационными (рис. 7). Как видно, нейросетевые алгоритмы работают медленнее, чем ICP, но есть определенная разница с CPD. Это связано с тем, что CPD значительно сложнее, чем все остальные алгоритмы. ICP, к сожалению, все еще недостижим по производительности для нейросетевых алгоритмов.

Таким образом, в результате сравнения алгоритмов можно сделать вывод, что нейросетевые алгоритмы можно использовать во встраиваемых системах, но их производительность все равно будет меньше, чем в ICP. Значит, применение подобных алгоритмов имеет смысл в случаях, когда отсутствует другой источник одометрии и перемещение будет значительным.

Список использованных ресурсов

- 1. Pomerleau F., Colas F., Siegwart R., Magnenat S. Comparing ICP Variants on Real-World Data Sets. Autonomous Robots. − 2013. − T. 34. − № 3. − Pp. 133–148.
- 2. Rusu R.B., Blodow N., Beetz M. Fast Point Feature Histograms (FPFH) for 3D Registration. arXiv preprint arXiv:0905.2635. 2009.
- 3. Papers with Code. Point Cloud Registration. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://paperswithcode.com/task/point-cloud-registration(дата обращения: 20.02.2024).
- 4. 3DMatch: Learning Local Geometric Descriptors from RGB-D Reconstructions. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://3dmatch.cs.princeton.edu/ (дата обращения: 20.02.2024).

УДК 004.89

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СТОМАТОЛОГИИ

Климакова Т.Ф.¹ (студент) **Научный руководитель** – к.т.н. **Русак А.В.**¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: T.Klimakova2710@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Автономные интеллектуальные системы».

Данная статья представляет обзор исследований, посвященных применению методов машинного обучения в стоматологии. В работе рассматриваются подходы к использованию алгоритмов машинного обучения для диагностики различных заболеваний полости рта, прогнозирования их развития, а также оптимизации лечебных процессов. Также обсуждаются перспективы дальнейшего развития этой области и возможные проблемы, связанные с внедрением и использованием искусственного интеллекта в стоматологической практике.

Ключевые слова

Машинное обучение, искусственный интеллект в медицине, стоматология, нейронные сети, генетический алгоритм.

Машинное обучение становится все более популярным в медицинской диагностике и лечении, и стоматология не является исключением. В данной статье рассматривается, как методы машинного обучения можно использовать для анализа данных снимков зубов, диагностики заболеваний полости рта, планирования лечения и мониторинга здоровья пациентов. Обзор применения нейронных сетей и алгоритмов машинного обучения проведен на основе пяти разделов стоматологии: эндодонтии, заболеваний височно-нижнечелюстного сустава, протезирования, ортодонтии и пародонтологии.

Эндодонтия — раздел стоматологии, предметом изучения которого являются болезни эндодонта, в частности, патологические изменения в периодонте и пульпе. Наравне с диагностикой и лечением корневых каналов зубов, специалисты в данной области занимаются манипуляциями в полости зуба при травмах.

Основные вопросы, решаемые с помощью методов машинного обучения и нейронных сетей в данном разделе стоматологии:

- 1) прогнозирование периапикальных патологий;
- 2) выявление переломов корня;
- 3) морфология корня;
- 4) проверка рабочей длины, отслеживание апикального отверстия;
- 5) прогнозы повторного лечения.

В качестве примера рассматривается исследование надёжности искусственной нейронной сети в определении местоположения малого апикального отверстия (отверстия небольших размеров на верхушке зубного корня) [1]. Точность нейронной сети оценивалась при попытке имитировать клиническую оценку рабочей длины корневых зубных каналов на 50 образцах удаленных зубов. Значение рабочей длины подтверждалось с помощью рентгенографии. Положение инструмента для работы с каналами зубов (эндодонтического напильника) относительно малого апикального отверстия классифицировалось как отдаленное, близкое и точное специалистом до удаления зуба, стереомикроскопически после, а также с помощью искусственной нейронной сети. Результаты сравнивались с помощью тестов Фридмана и

Уилкоксона при уровне значимости p < 0.05. Были обнаружены значительные различия между данными, полученными специалистами и нейронной сетью (p = 0.001), а также данными, полученными специалистами, и измерениями с помощью стереомикроскопа после удаления. Нейронная сеть определила правильное анатомическое положение 96 % зубов, в то время как точность оценки стоматологами-эндодонтистами составила 76 %. Следовательно, нейронная сеть оказалась точнее, чем эндодонтическая маркировка, по сравнению с фактическими измерениями рабочей длины с использованием стереомикроскопа. Таким образом, данное исследование показало, что использование искусственных нейронных сетей может быть эффективным способом точного определения длины корневых зубных каналов, что важно для успешного эндодонтического лечения и сохранения зубов в долгосрочной перспективе.

Следующим разделом рассмотрения взяты патологии височно-нижнечелюстного сустава (ВНЧС). Наиболее часто встречающиеся заболевания:

- 1) артрит;
- 2) артроз;
- анкилоз;
- 4) вывих и подвывих головки сустава;
- 5) мышечно-суставная дисфункция.

С целью оказания помощи при сложных с точки зрения сбора анамнеза и дальнейшего лечения заболеваниях суставов применяются новейшие технологии искусственного интеллекта. Исследование [2] посвящено анализу результатов магнитно-резонансной томографии (МРТ) для диагностики случаев возникновения подобных патологий. Целью исследования было выявление динамики развития ВНЧС с учетом влияния обнаруженных патологий на существующие, а также потенциальные заболевания. Для достижения цели были отобраны снимки МРТ и сопутствующие им диагнозы пациентов. Точность байесовской сети убеждений сравнивалась с использованием других алгоритмов: логарифмической оценки максимального правдоподобия, жадного поиска, наивного байесовского классификатора, множественного регрессионного анализа и др. С помощью байесовской сети можно представлять причинноследственные связи между различными результатами и приписать условные вероятности, которые затем могут быть использованы для интерпретации прогрессирования заболеваний. Алгоритм показал точность более 99% при использовании десятикратной перекрестной проверки. Результаты программы могут быть полезны в клинической практике, особенно при работе с такой сложной темой.

Одним из главных минусов в области протезирования является ограниченность срока службы зубных реставраций. Продолжительность эксплуатации может быть определена материалом, который используется, а также особенностями самого зуба. Для решения данной проблемы на основе наборов данных из графиков, радиологической информации, полученной в результате анализа с применением методов искусственного интеллекта, предпринимаются попытки определить продолжительность процедуры, наиболее подходящий материал для восстановления полостей, тип реконструкции, а также проводить долгосрочный мониторинг процесса реконструкции. Для классификации случаев возможна оценка данных с помощью многослойного персептрона и группы экспертов. Такие системы способны адаптироваться к новым ситуациям путем добавления новой информации в базу данных и обновления уже имеющихся данных, что затем может использоваться для новых прогнозов.

Для пациентов выбор материала, необходимого для заполнения или замещения дефекта, важен так же, как цвет пломбы или протезной реставрации. На сегодняшний день, подбор цвета керамической реставрации, более всего совпадающего с натуральным оттенком зуба остается одним из наиболее сложных аспектов в эстетической стоматологии. Нейронная сеть обратного распространения (BPNN) уже внедрена в компьютерный подбор цвета в стоматологии, однако нестабильность и низкая точность являются ее существенными недостатками. В исследовании [3] авторы используют генетический алгоритм (GA) для оптимизации начальных весов и пороговых значений в BPNN для повышения точности подбора цвета керамических зубов. Было показано, что предлагаемый метод повышает точность и предсказуемость подбора цвета в

комплексной стоматологии, что, в свою очередь, обеспечивает ему значительную практическую пенность.

В области ортодонтического лечения было обнаружено, что модели машинного обучения работают аналогично или даже с большей точностью, чем люди, например, при задачах идентификации ориентиров, классификации скелета, прогнозировании возраста костей и сегментации зубов. Примеры компаний, производящих программные продукты для решения различных проблем в области стоматологии, в частности – ортодонтии, представлены в таблице.

Таблица Компании и их продукты, основанные на машинном обучении в стоматологии

Компания	Продукт	Функция	Сайт	
Denti.AI	Denti.AI	Выявление стоматологических	https://www.denti.ai/	
		заболеваний		
		Выявление		
VideaHealth	VideaHealth	стоматологических	https://www.videa.ai/	
		заболеваний		
		Цефалометрический анализ,		
ORCA Dental AI	Cephx	сегментация зубов, анализ	https://www.orca-ai.com/	
		дыхательных путей		
		Цефалометрический анализ,		
CellmatiQ GmbH	DentaliQ ortho	выявление	https://cellmatiq.com/	
	DentaliQ opg	стоматологических	https://eemmarq.eom/	
		заболеваний		
Zhibeicloud	DentaliQ ortho Цефалометрический анализ,			
	DentaliQ opg	анализ костного возраста,	https://www.aortho360.com/	
	Dentand opg	эстетический анализ лица		

Между тем, по сравнению с экспертами-людьми алгоритмы машинного обучения обеспечивают высокую согласованность и стабильность в процедурах принятия ортодонтических решений и оценке эффекта лечения.

Одним из актуальных вопросов в ортодонтии является решение спора по поводу экстракционного и неэкстракционного ортодонтического лечения. В исследовании, нацеленном на применение машинного обучения при принятии решения о необходимости заблаговременного удаления зубов у детей было обнаружено, что предлагаемая двуслойная нейронная сеть с 23 признаками на входе (23-13-1), обученная методом обратного распространения ошибки, обладает точностью 80% на тестовых данных при определении того, является ли лечение с удалением или без удаления зубов наилучшим для пациентов с аномалиями прикуса в возрасте от 11 до 15 лет [4]. Помимо нейронных сетей в данной области применяется метод случайного леса, показывающий более низкую частоту ошибок в отношении необходимости удаления зубов.

В области пародонтологии (разделе стоматологии, включающем в себя диагностику, лечение и профилактику заболеваний окружающих основание зубов тканей — пародонта, и их патологий) и заболеваний слизистых оболочек были проведены исследования состава слюны и микроорганизмов во рту. В одном из подобных исследований представлен эффективный метод классификации неприятного запаха изо рта по микробиоте полости рта в слюне с использованием метода опорных векторов, искусственной нейронной сети и дерева решений [5]. По результатам исследований метод опорных векторов показал наивысшую точность классификации с чувствительностью 51,1% и специфичностью 95,0%. Искусственная нейронная сеть и дерево решений обеспечили более низкую точность классификации.

Таким образом, проведенный обзор показал, что в стоматологии методы машинного обучения представляют собой мощный инструмент для улучшения диагностики, планирования лечения и прогнозирования его результатов. Диагностика, проводимая с использованием

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Программная инженерия и компьютерные технологии

искусственного интеллекта, является более безопасной и надежной. Применение различных методов машинного обучения дает возможность определять скрытые закономерности среди патологий, проводить анализ больших объемов данных, создавать индивидуальные подходы к каждому пациенту.

Список использованных источников

- 1. Mohammad Ali Saghiri, Franklin Garcia-Godoy, James L Gutmann, Mehrdad Lotfi, Kamal Asgar The reliability of artificial neural network in locating minor apical foramen: a cadaver study. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/22794221/ (дата обращения: 10.01.2024).
- 2. Iwasaki H. Bayesian belief network analysis applied to determine the progression of temporomandibular disorders using MRI. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.birpublications.org/doi/full/10.1259/dmfr.20140279 (дата обращения: 23.12.2023).
- 3. Haisheng Li, Long Lai, Li Chen, Cheng Lu, Qiang Cai The prediction in computer color matching of dentistry based on GA+BP neural network. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.hindawi.com/journals/cmmm/2015/816719/ (дата обращения: 09.01.2024).
- 4. Xie X, Wang L, Wang A. Artificial neural network modeling for deciding if extractions are necessary prior to orthodontic treatment. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/19905850/ (дата обращения: 08.11.2023).
- Nakano Y, Takeshita T, Kamio N. Supervised machine learning-based classification of oral malodor based on the microbiota in saliva samples. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0933365713001619 (дата обращения: 13.01.2024).

УДК 004.93'12

ГЕНЕРАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ РЕДКИХ КЛАССОВ С ПОМОЩЬЮ GAN И DIFFUSION МОДЕЛЕЙ

Милантьев С.А.¹ (аспирант), Бессмертный И.А.² Научный руководитель – д.т.н., профессор Бессмертный И.А.²

- 1 Институт аналитического приборостроения РАН
- 2 Университет ИТМО

e-mail: nevdev@niuitmo.ru

В данной работе представлены методы генерации изображений кожных поражений с использованием GAN моделей, а также генерации бинарных масок кожных поражений диффузионной моделью. Основная цель данного исследования состоит в применении указанных методов для улучшения эффективности моделей в задаче многоклассовой классификации кожных новообразований.

Экспериментально было установлено, что по полученным результатам диффузионная модель обладает схожими результатами с моделью Split-Attention U-Net. Для повышения эффективности оптимизации GAN моделей была предложена функция потерь, основанная на вычислении косинусного сходства между эталоном и сгенерированными образцами. Для анализа влияния сгенерированных данных на процесс оптимизации были рассмотрены различные архитектуры моделей, такие как VGG19, EfficientNet-B0, ResNet50, ViT_B_16, обученные с одинаковыми гиперпараметрами и оцененные на тестовом наборе данных. Экспериментально выявлено, что классификаторы, обученные с использованием сгенерированных образцов для каждого класса в обучающей выборке, демонстрируют более высокие показатели метрик.

Ключевые слова

Компьютерное зрение, сверточные нейронные сети, генерация медицинских снимков, кожные новообразования, анализ кожных новообразований, генерация кожных новообразований.

Поиск медицинских новообразований на ранних этапах их развития представляет собой существенную проблему в современной медицине. Автоматизированные методы анализа новообразований, в том числе кожные поражения, являются перспективным вектором исследований. Однако для обучения классификаторов, способных эффективно обобщать кожные поражения по нескольким классам, требуется значительный объем данных по каждому классу. Проблема недостатка данных по редким классам кожных поражений приводит к смещению весов модели в пользу наиболее распространенных классов за счет их большего количества образцов. Кроме того, аугментация данных или другие методы предобработки не всегда позволяют решить эту проблему, особенно в контексте повышения качества анализа редких классов кожных поражений.

Целью данной работы является разработка методов для улучшения автоматического анализа кожных новообразований, включая разработку генеративных моделей для генерации бинарных масок с использованием диффузионной модели и создание дополнительных данных с помощью генеративно-состязательных моделей. Автоматическая генерация медицинских данных на основе эталонных представлений по классам является важным шагом в создании дополнительных данных для редких классов кожных новообразований.

Несмотря на предполагаемое улучшение показателей метрик моделей на тестовых наборах данных, медицинские изображения могут содержать детали, требующие дополнительной оценки. Проведение дополнительной проверки сгенерированных медицинских изображений экспертом в области медицины является важной практикой, направленной на обеспечение высокой точности диагностики и минимизацию ошибок. Этот процесс добавляет

дополнительный уровень уверенности в результатах. Однако данный этап выходит за рамки данного исследования.

ДАННЫЕ

В данном исследовании рассматриваются задачи многоклассовой классификации и сегментации кожных поражений. Для этого использовались датасеты ISIC-2017 [1] и ISIC-2018 [2-3] для решения задачи сегментации, а именно нахождению площади кожных поражений при помощи диффузионной модели, с последующим сравнением с другими сегментационными моделями на тестовом наборе данных.

Для решения задачи многоклассовой классификации и генерации изображений кожных поражений использовался датасет ISIC-2019 [1-2, 4]. В частности, этот датасет использовался для генерации дополнительных изображений кожных поражений с использованием генеративно-состязательных моделей и для оценки влияния полученных изображений на метрики классификационных моделей на тестовом датасете.

В таблице 1 приведены количественные характеристики каждой из выборок.

Количественные характеристики выборок

Таблица 1

Task	Datasets	Train	Valid	Test
Сегментация	ISIC-2017 ISIC-2018	9 248	2 466	3 700
Генерация и Классификация	ISIC-2019	20 147	5 373	8 059

Ниже представлен список соответствия классов кожных поражений, представленных в датасете ISIC для классификации:

- меланома (MEL);
- меланоцитарный невус (NV);
- базальноклеточная карцинома (ВСС);
- актинический кератоз (AK);
- кератоз, базалиома (BKL);
- дерматофиброма (DF);
- сосудистое поражение (VASC);
- сквамозно-клеточная карцинома, спиналиома (SCC).

В задаче классификации не применялись дополнительные аугментации к данным для оценки влияния синтетических данных. Однако для остальных задач применялись аффинные и текстурные преобразования, которые обеспечивают дополнительный механизм регуляризации в моделях сверточных нейронных сетей.

МЕТОДЫ И ПОДХОДЫ

Общий подход

Значимость формы кожного поражения крайне важна, особенно при анализе редких кожных заболеваний. Предпосылками к такому вектору экспериментов являются исследования в ИАП РАН, где предложили метод съемки кожных новообразований с помощью специализированного прибора, который осуществляет серию снимков с различными длинами волн диодов. Ранее были разработаны несколько типов архитектур, позволяющих достичь относительно хороших результатов при классификации кожных поражений с применением ансамблирования моделей [5]. На рисунке 1 представлена одна из первых версий модели для многоклассовой классификации кожных поражений и метаданных пациента.

Далее, была выполнена серия дополнительных экспериментов, которые выходят за пределы данного исследования, в результате которых сеть был добавлен дополнительный акцент внимания сети на признаки формы поражения за счет добавления сегментационной сети Split-Attention U-Net. Данная сеть продемонстрировала лучшие результаты по показателям метрик на тестовом наборе данных и обладала низкой вычислительной сложностью во время обучения за счет использования блока Split-Attention в первом слое модели.

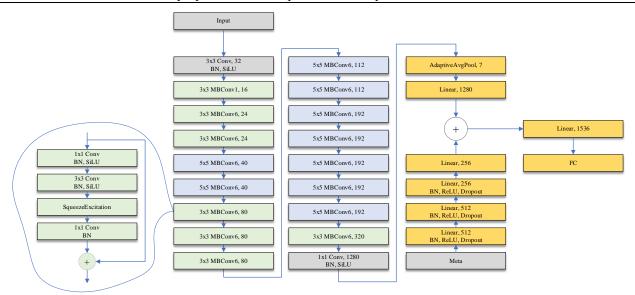


Рис. 1. Общая архитектура моделей для анализа кожных поражений

Генерация маски с помощью диффузионной модели

Одним из вектором данного исследования было применение диффузионной модели для создания бинарной маски, отражающей форму кожного поражения. Основная предпосылка заключалась в последовательном «размывании» исходных изображений кожных поражений, которые постепенно изменяют свою структуру, при этом сохраняя ключевые характеристики своего класса новообразований. Этот процесс контролируется параметром диффузии, который определяет скорость изменения данных.

В рамках данной работы диффузионные модели используются для генерации данных, максимально соответствующие характеристикам обучающей выборки. К примеру, с помощью диффузионной модели можно выполнить генерации бинарных масок, чувствительных к текстурным изменениям, что в некоторых случаях может быть более точным методом, чем ручная разметка.

В данной работе были проведены попытки улучшить сегментационную часть представленной модели. Для обучения и оценки моделей использовались наборы данных ISIC-17 и ISIC-18. Однако после проведения ряда экспериментов по сегментации кожных поражений с использованием диффузионной модели не удалось добиться значимых результатов в этом направлении.

Сегментационная модель Split-Attention U-Net продемонстрировала лучшие показателями метрик IoU по сравнению с диффузионной моделью, достигнув значения 0.7641 против 0.7417 у диффузионной модели. На основании полученных результатов можно предположить, что диффузионная модель менее эффективна при сегментации кожных поражений с размытой текстурной составляющей по сравнению с альтернативными сетями на основе U-Net.

На рисунке 2 приведены примеры генерации бинарной маски по классу дерматофиброма с использованием диффузионного процесса. Визуально заметно, что полученные маски в первом и третьем случаях более точно соответствуют ручной разметки Ground Truth. При это второй случай, где кожное поражение обладает менее выраженной текстурой, диффузионная модель генерирует более грубую маску.

Генерация кожных поражений по классам с помощью GAN

Вторым вектором исследования является генерация изображений кожных поражений редких классов при помощи генеративно-состязательных сетей (GAN). GAN представляет собой нейронную сеть, предназначенную для генерации изображений высокого качества через механизм соперничества между генеративной и дискриминативной моделями.

Модель генератора инициализирует случайный шум, исходя из заданного распределения, и генерирует синтетические данные, максимально приближенные к реальным, сохраняющие ключевые свойства оригинала и постепенно улучшая качество генерируемых данных. Модель

дискриминатора выполняет классификацию реальных и сгенерированных генератором данных с целью выявления сгенерированных образцов. Таким образом, модель генератора оптимизируется для "обмана" модели дискриминатора, в то время как дискриминатор оптимизируется для обнаружения синтетических данных.

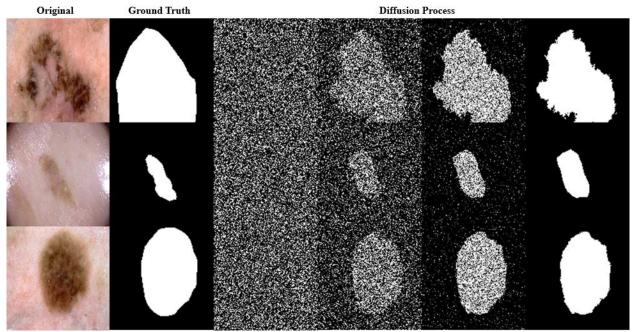


Рис. 2. Генерация маски по классу DF с помощью диффузионной модели

Основная идея эксперимента заключалась в попытке улучшения качества классификационных моделей, представленных на рисунке 1, путем использования сгенерированных изображений в процессе обучения. Основные эксперименты проводились с использованием архитектуры WGAN. В качестве данных использовался набор данных ISIC-19. Затем для каждого класса проводилось обучение генеративно-состязательных сетей.

Также, для обучения WGAN моделей была предложена функция потерь, основанная на вычислении сходства между классами для дополнительного штрафа генератора (1).

$$\frac{Loss_{gen}}{j \neq i, j \in [0, n]} = Loss_{WGAN} + \sum_{j=1}^{n} (cos_{sim}(G, I_j) + (1 - cos_{sim}(G, I_i))), \tag{1}$$

где n — количество классов; cos_{sim} — функция для вычисления косинусного сходства; G_i — сгенерированное изображение по классу i; I_i — эталонное изображение по классу i; I_j — эталонные изображения по классам $j \in [0, n]$.

Для оценки коэффициента Отиаи были сформированы эталонные образцы для каждого заданного класса кожных поражений, (в данной работе использовалась генерация по всем классам), используя несколько сверточных слоев с сохранением размерности. На каждой итерации обучения вычислялись суммы косинусного сходства между сгенерированным изображением и эталоном класса $(1 - cos_{sim}(G, I_i))$, а также между сгенерированным изображением и эталонами по остальным классам $(cos_{sim}(G, I_i))$.

Таким образом, минимизировалась схожесть между сгенерированным изображением класса и эталонами других классов, а максимизировалась схожесть сгенерированного изображения и эталона по такому же классу (рис. 3). Полученную информацию можно представить в виде матрицы сходства, где каждая ячейка представляет косинусное сходство между эталоном и сгенерированным изображением.

На рисунке 4 представлены примеры 12 сгенерированных изображений по классу дерматофиброма с использованием генеративно-состязательных сетей WGAN.

	I ₁	I ₂	 In
G_1	$G_1 \cdot I_1$	$G_1 \cdot I_2$	 $G_1 \cdot I_n$
G_2	$G_2 \cdot I_1$	$G_2 \cdot I_2$	 $G_2 \cdot I_n$
G _n	$G_n \cdot I_1$	$G_n \cdot I_2$	 $G_n \cdot I_n$

Рис. 3. Матрица сходства сгенерированных объектов к эталонам

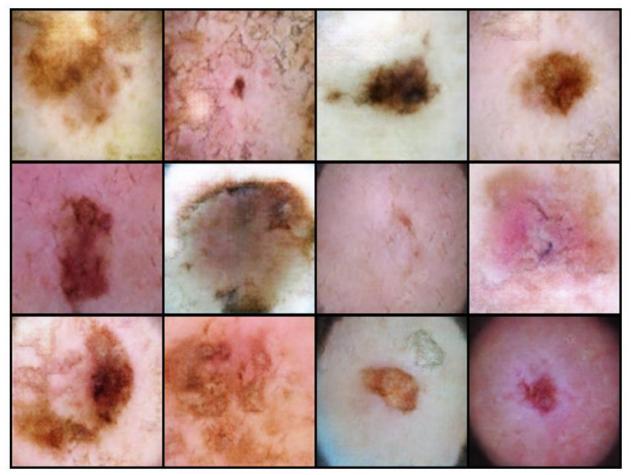


Рис. 4. Генерация изображений по классу DF с помощью WGAN модели

Оценка применимости сгенерированных изображений

Для оценки влияния добавления сгенерированных изображений кожных новообразований в обучающую выборку были использованы следующие виды классификационных моделей: VGG19, EfficientNet-B0, ResNet50, Vision Transformer (ViT_B_16). Каждая из моделей была обучена в трех вариациях:

- базовая версия, где модель обучалась стандартным образом и затем оценивалась на тестовом множестве;
- базовая версия, обученная с использованием дополнительных 100 сгенерированных образцов для каждого класса с помощью WGAN;
- базовая версия, обученная с использованием дополнительных 100 сгенерированных образцов для каждого класса с помощью WGAN, в которых в процессе обучения была использована функция потерь с фактором косинусного сходства.

В качестве тестового датасета для замера степени влияния, сформированная на основе ISIC-2019 и состоящая из 8 059 изображений.

Для обеспечения единообразия ко всем входным данным было применено преобразование размерности до 224х224 пикселов, а сами модели обучались в течение 40 эпох при постоянных параметрах. Кроме того, для каждого набора данных были сформированы загрузчики данных с размерами пакетов: 64 для тренировочной, 32 для валидационной и по одному изображению для тестовой выборки.

Полученные наборы данных были строго определены заранее во всех экспериментах для обеспечения статистической значимости, возможности сравнивания результатов экспериментов и оценки всех положительных изменений. В решении поставленной задачи использовались оптимизатор AdamW (learning_rate=1e-4, weight_decay=1e-3) и стратегия изменения скорости обучения CosineAnnealingWarmRestarts.

Результаты

В данном исследовании были получены показатели метрик для решения задачи многоклассовой классификации на тестовой выборке, результаты которых представлены в таблице 2.

Таблица 2

Метрики моделей

Модели	Baseline		WGAN (n=100)			WGAN (n=100) + Loss _{cos_sim}			
	Precision	Recall	F1- Score	Precision	Recall	F1- Score	Precision	Recall	F1- Score
VGG19	0.7477	0.7385	0.7236	0.7375	0.7266	0.7109	0.745	0.7468	0.7275
EfficientNet-B0	0.7593	0.7571	0.7376	0.7639	0.7595	0.7435	0.7801	0.7599	0.7484
ResNet50	0.763	0.7571	0.7414	0.7718	0.7536	0.7405	0.783	0.7762	0.7628
ViT_B_16	0.7885	0.7865	0.7711	0.7975	0.7909	0.7737	0.803	0.7956	0.7796

С целью оценки эффективности было проведено сравнение метрик базовых версий моделей "из коробки" и тех же моделей, если каждому классу сгенерировать по 100 экземпляров изображений.

Для оценки эффективности каждой модели были использованы основные классификационные метрики: полнота (recall), точность положительных прогнозов (precision) и F1-мера (f1-score). Среди выбранных для эксперимента моделей, а именно VGG19, EfficientNet-B0, ResNet50 и Vision Transformer, на основании результатов эксперимента, была выявлена тенденция к улучшению показателей метрик при использовании сгенерированных образцов при обучении. Кроме того, показатели метрик также увеличились при оптимизации WGAN модели на основе функции потерь с учетом фактора сходства.

В данной работе были проведены эксперименты по генерации бинарной маски кожных поражений с помощью диффузионной модели и по генерации изображений кожных поражений на основе эталонов по каждому классу.

Исходя из проведенных экспериментов, можно сделать вывод, что генерация изображений в чистом виде не всегда улучшает показатели модели. Однако введение дополнительных штрафов генератору в виде улучшенной функции потерь повышает потенциал моделей во всех оцененных случаях. При этом диффузионная модель для генерации бинарной маски демонстрирует нестабильную работу в случаях кожных новообразований с плавной текстурой.

Несмотря на успешность эксперимента по генерации изображений с помощью WGAN, необходимо дополнительно изучить эталоны с точки зрения медицины по каждому классу и генерируемые образцы для подтверждения гипотезы.

В качестве дальнейших исследований планируются следующее:

- интерпретация моделей с помощью метода Grad-CAM;
- оценка модели вариационного автокодировщика для генерации изображений;

— замена коэффициента Отиаи на дивергенцию Кульбака-Лейблера и оценка данного изменения на тестовом наборе данных.

Список использованных источников

- 1. Codella N.C.F. et al. Skin lesion analysis toward melanoma detection // A challenge at the 2017 International symposium on biomedical imaging (ISBI), hosted by the international skin imaging collaboration (ISIC). // 2018 IEEE 15th International Symposium on Biomedical Imaging (ISBI 2018). 2018. Pp. 168–172. DOI: 10.1109/ISBI.2018.8363547.
- 2. Tschandl P., Rosendahl C., Kittler H. The HAM10000 dataset, a large collection of multi-sources dermatoscopic images of common pigmented skin lesions // Sci Data 5, 180161. 2018. DOI: 10.1038/sdata.2018.161.
- 3. Codella N., Rotemberg V., Tschandl P. et al. Skin Lesion Analysis Toward Melanoma Detection 2018: A Challenge Hosted by the International Skin Imaging Collaboration (ISIC). 2018; arXiv: 1902.03368 [cs.CV].
- 4. Combalia M., Codella N., Rotemberg V., et al. BCN20000: Dermoscopic lesions in the wild // 2019. arXiv:1908.02288.
- 5. Milantev S., Bessmertnyi I., et al. Skin lesion analysis using ensemble of CNN with dermoscopic images and metadata // CEUR Workshop Proceedings. 2021. V. 2893.

УДК 004.93

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ДЕКОДИРОВАНИЯ АУДИОИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА

Нагоев А.А. ¹ (студент) **Научный руководитель** – к.т.н. **Русак А.В.** ¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: askernagoev@niuitmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В исследовании сопоставляются различные подходы к нейронному декодированию аудиоинформации, которые базируются на методах машинного обучения, применяемых для анализа сигналов об активности головного мозга. Выявляются преимущества и недостатки существующих подходов, наиболее эффективные методы нейровизуализации и обработки данных с целью определения оптимального направления для дальнейшего развития в данной области.

Ключевые слова

Нейротехнологии, нейронное декодирование, нейроинтерфейсы, интерфейсы мозг-компьютер, нейровизуализация, машинное обучение, анализ активности головного мозга.

Одним из актуальных направлений исследований в нейротехнологиях сегодня является нейронное декодирование. Данный процесс делает возможным восстановление визуальной и аудиоинформации на основе данных о работе мозга человека. Это открывает новые возможности для разработки нейроинтерфейсов (интерфейсов мозг-компьютер) – систем, созданных для обмена информацией между мозгом и электронным устройством напрямую, без периферических устройств. Существующие методы декодирования основываются на различных подходах анализу мозговой активности: К c использованием (электроэнцефалографии), ЭКоГ (электрокортикографии), фМРТ (функциональной магнитнорезонансной томографии) и т. д. Несмотря на значительный прогресс, каждый из методов нейровизуализации имеет свои недостатки, среди которых ограниченная точность, высокая стоимость или сложность в интерпретации результатов. В работе представлен анализ методов декодирования, их преимуществ и недостатков, а также стратегии улучшения точности.

Преобразование сигналов окружающей среды и внутренних сигналов тела в репрезентации этих сигналов в виде паттернов активности нейронов для создания модели реальности с целью адаптации и осуществления целенаправленных действий, сохранения целостности и нормального функционирования организма называется нейронным кодированием. А воссоздание стимулов на основе паттернов активности нейронов в мозге — нейронным декодированием [1]. Предпосылки к разработке методов нейронного декодирования для идентификации множества различных видов умственной деятельности стали появляться с 2008 года, когда вышла статья по предсказыванию мозговой активности, связанной со значениями существительных английского языка [2]. В последние годы декодирование подразумевает использование методов машинного обучения для обработки данных о мозговой активности, полученных с помощью различных методов нейровизуализации [3]. Данные методы используются для получения информации о состоянии нейронов головного мозга. К наиболее популярным относятся:

- электроэнцефалография (ЭЭГ);
- магнитоэнцефалография (МЭГ);

- компьютерная томография (КТ);
- функциональная магнитно-резонансная томография (фМРТ).

Наиболее распространенным методом в нейроинтерфейсах является ЭЭГ за счет ее безопасности (неинвазивный метод), высокой временной разрешающей способности, портативности и относительно невысокой стоимости.

Методы машинного обучения используются для решения двух задач: восстановления исходного стимула или умственной активности и идентификации категории стимула или воображения.

На сегодняшний день достигнуты определенные результаты в декодировании аудиоинформации. Воссоздание музыки требует наличия данных о громкости, ритме, тоне в декодируемой информации [4]. А значения этих показателей могут быть использованы для озвучивания представляемой речи у больных людей с желаемой интонацией [5]. Разработка мозгового интерфейса, способного делиться с мобильными устройствами расшифрованным кодом через технологии Bluetooth или Wi-Fi, обогатит сферу развлечений: появятся приложения, например, угадывающие музыку, воображаемую в голове, или выдающие оригинал воображаемой песни.

Проведение эксперимента по декодированию аудиоинформации включает в себя ряд этапов: создание стимулов (подбор готовых), сбор данных с использованием одного или нескольких методов нейровизуализации, предобработка данных (как аудиостимулов, так и данных, полученных методами нейровизуализации), выбор методов машинного обучения для распознавания стимулов по данным активности головного мозга, построение и тестирование модели, анализ результатов. Использование готовых наборов данных может упростить процесс проведения эксперимента, но необходимо тщательно проверить их качество и соответствие поставленным целям и задачам исследования.

Сравнительный обзор существующих исследований по декодированию аудиоинформации представлен в таблице ниже. Их анализ показывает, что для сбора данных чаще всего используется ЭЭГ. В качестве аудиостимулов используются как специально созданные авторами композиции, так и существующие известные произведения. На этапе предобработки чаще встречается такой метод, как анализ независимых компонент (ICA), применяемый для борьбы с различного рода артефактами. В некоторых работах для распознавания стимулов используются методы классического машинного обучения, однако нейросети наиболее успешны в задачах декодирования.

Прашант Лоухатре, Бхаратеш Р. Ширагуппи и другие исследователи — авторы первой работы, оценили эффективность методов классического обучения с учителем, без учителя и глубокого обучения. Учеными были сделаны выводы, показывающие наилучшие результаты в поставленных задачах с использованием метода ближайших соседей (KNN). Чуть менее эффективными оказались градиентный бустинг (Gradient Boost) и многослойный перцептрон (MLP).

Более высокие результаты показывает исследование Иэна Дейли из Эссекского университета, проведенное немного позже (вторая работа). В нем используются неинвазивные методы нейровизуализации: ЭЭГ и фМРТ. Главный недостаток ЭЭГ заключается в низкой пространственной разрешающей способности, а у фМРТ она высокая.

В ходе эксперимента были использованы два набора данных. Первый содержит ЭЭГ и фМРТ по каждому испытуемому, а второй ЭЭГ и усредненный фМРТ по всем из первого набора. По первому набору данных успешность была выше: усредненная точность составила 71.8%, а по второму набору — 59.2%. Для извлечения информации из ЭЭГ, связанной с прослушиванием музыки, а затем для декодирования музыкальных произведений, которые слушал человек, использовалась двунаправленная рекуррентная нейронная сеть (RNN) с долгой краткосрочной памятью (BiLSTM).

Таблица

Сравнительный обзор исследований

No	1	2	и оозор исследс 3	4	5
Название статьи	Classifying Songs with EEG	Neural decoding of music from the EEG	Identifying musical pieces from fMRI data using encoding and decoding models	Music can be reconstructed from human auditory cortex activity using nonlinear decoding models	Toward Studying Music Cognition with Information Retrieval Techniques: Lessons Learned from the OpenMIIR Initiative
Сбор данных	ЭЭГ	ЭЭГ, фМРТ	фМРТ	ЭКоГ, МРТ, КТ	ЭЭГ
Аудиостимул ы	ŀ	Сгенериров анные фортепианн ые произведен ия	40 композиций из разных жанров	«Another Brick in the Wall»	Набор данных OpenMIIR
Предобработк а	Wavedec, DFA	AAS (Vision Analyser), ICA, SOBI	Savitzky-Golay filter, MIRtoolbox	Фильтр Баттерворта, Преобразование Гильберта	ICA
Методы МО	Классическо е обучение (KNN)	Рекурентна я нейронная сеть (biLSTM)	Множественная линейная регрессия	MLPRegressor	SVC
Результаты	Max classification accuracy (27.59%)	Mean decoding performance s of 71.8% and 59.2%	Identification accuracy for all individuals: $76.8\% \pm 6.5\%$ (mean \pm SD)	Decoding accuracy (r- squared of 42.9%)	Classification accuracy (27.59%)
Год	2020	2023	2018	2023	2017

Наиболее свежее исследование в данной области было проведено группой учёных из Калифорнийского университета в Беркли, которым удалось декодировать песню группы Pink Floyd «Another Brick in the Wall» (четвертая работа, таблица). Данные об активности мозга были получены с помощью инвазивного метода ЭКоГ, а позже обработаны с использованием данных с МРТ и КТ. Время с момента получения первых данных до выхода статьи составляет больше 15 лет, ведь записи были получены в 2008 и 2015 годах. Интересно также отметить, что использованная при декодировании активность наблюдалась в трех зонах коры головного мозга в обоих полушариях: преимущественно в верхней височной извилине (STG), в меньшей степени в сенсомоторной коре (область между прецентральной и постцентральной извилинами) и в нижней лобной извилине (IFG).

Сравнение успешности различных типов нейросети в декодировании аудиоинформации затрудняется тем, что используемые в работах метрики различаются. Тем не менее выделяется четвертая работа — единственное найденное исследование, позволяющее ознакомиться со звуковым файлом декодированной музыки в открытых источниках.

В исследовании были рассмотрены основные методы, используемые для декодирования аудиоинформации на основе анализа сигналов об активности головного мозга. Было установлено, что сочетание методов ЭЭГ и фМРТ предоставляет наиболее высокие результаты при декодировании, несмотря на существующие недостатки каждого из методов по отдельности. Результаты показывают обнадеживающий потенциал в развитии более точных и доступных технологий декодирования, что может значительно повысить качество жизни людей

с нарушениями речи и слуха. Дальнейшие исследования должны сосредоточиться на улучшении алгоритмов машинного обучения и разработке более эффективных методов предобработки данных для повышения точности результата и уменьшения времени обработки данных.

Список использованных источников

- 1. Johnson K.O. Neural coding // Neuron. 2000. V. 26. №. 3. Pp. 563–566.
- 2. Mitchell T.M., Svetlana V.S., Andrew C., Kai-Min C., Vicente L.M., Robert A.M., Marcel A.J. Predicting human brain activity associated with the meanings of nouns // Science. − 2008. − V. 30. − №. 320. − Pp. 1191–1195.
- 3. Di Liberto G.M., Marion G., Shamma S.A. Accurate decoding of imagined and heard melodies // Front. Neurosci. 2021. V. 15. №. 673401.
- 4. Harding E.E., Sammler D., Henry M.J., Large E.W., Kotz S.A. Cortical tracking of rhythm in music and speech // Neuroimage. 2019. №. 185. Pp. 96–101.
- Decoding Music from the Mind [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://neurosciencenews.com/music-brain-decoding-bmi-23786/ (дата обращения: 24.01.2024).

УДК 004.75

СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕПЦИЙ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ФРОНТЕНД-ПРИЛОЖЕНИЙ

Назаренко В.В.¹ (студент), Морщинина Л.В.¹ (студент) Научный руководитель – доцент, к.пед.н. Государев И.Б.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: 371436@edu.itmo.ru

Работа выполнена в рамках НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В ходе данной работы исследованы способы развертывания фронтенд-приложений без использования сервера, а также проведен эксперимент производительности каждого из способов с использованием прототипа веб-приложения. Определены критерии эффективности для проведения сравнительного исследования, рассмотрены преимущества и недостатки каждой концепции.

Ключевые слова

Фронтенд-приложение, хостинг объектного хранилища, бессерверный контейнер, развертывание фронтенд-приложений, публичное облако.

На сегодняшний день огромную популярность набирает использование бессерверных сред для развёртывания веб-приложений. Это связано с тем, что развертывание приложений требуют больших ресурсов. Развитие бессерверных технологий позволяет упростить процесс развертывания и снизить затраты на инфраструктуру. Существует несколько ключевых аспектов, способствующих привлекательности данного способа для бизнеса: оптимизация затрат, быстрое развертывание и обновление, автоматическое масштабирование. Эти факторы напрямую влияют на экономическую сторону бизнеса, так как способствуют повышению эффективности и снижению стоимости владения инфраструктурой.

Выбор метода развертывания является сложным и нетривиальным вопросом, так как при выборе следует опираться на достоинства и недостатки каждого. В связи с вышеизложенным, возникла потребность разобраться в особенностях выбора технологии развертывания приложений, плюсах и минусах использования каждой из них.

В данной статье исследованы различные подходы развертывания фронтенд-приложений как в бессерверной среде, так и классической серверной среде, рассмотрены преимущества и недостатки каждого из способов.

В качестве концепций для исследования были выбраны:

- 1. Размещение веб-сайта в объектном хранилище (Yandex Object Storage).
- 2. Развертывание в бессерверном контейнере (Yandex Serverless Containers).
- 3. Развертывание в Docker-контейнере на виртуальной машине (Yandex Compute Cloud).

Согласно документации [1], объектное хранилище Yandex Object Storage является универсальным масштабируемым решением для хранения данных. В качестве преимуществ данной можно выделить простой интерфейс для создания и управления выделенными частями хранилища Object Storage для пользовательских данных (бакеты [1]), загрузки и скачивания контента. Создание и настройка осуществляются как с помощью консоли управления, так и с помощью инструмента Terraform. Загрузка контента через консольную утилиту AWS или API облака. В отношении масштабирования системы документация [1] декларирует, что объектное хранилище S3 автоматически расширяется по мере необходимости. Однако в документации не указаны возможные ограничения, чтобы понять, как именно система будет масштабироваться [2] при росте объема данных и запросов.

Помимо функций S3 хранилища, Yandex Object Storage поддерживает хостинг статических веб-сайтов с автоматическим созданием служебного домена по имени бакета. Для размещения веб-приложения таким образом приложение должно быть представлено в виде набора файлов HTML, CS, JS, которые могут быть отправлены клиенту при обращении к хостингу. Фронтенд-приложения, созданные с помощью фреймворков, должны быть загружены в бакет объектного хранилища в виде сборки, которая представляет собой минимизированный код приложения.

Бессерверные контейнеры Yandex Serverless Containers [3] позволяют запускать Docker-контейнеры в облаке по триггеру (HTTP-запросу или другому действию). Важной частью развертывания является сборка оптимизированного Docker-образа, так как увеличение размера занимаемой памяти замедляет процесс развертывания и время ответа при холодных стартах [4]. Наилучшим способом оптимизации работы фронтенд-приложения в такой среде является сборка контейнера с веб-сервером Nginx и приложением. Docker-образы развертываемых контейнеров должны храниться в реестре образов Yandex Container Registry, что является одним из основных условий работы сервиса. Как и в рассмотренном выше способе, масштабирование осуществляется автоматически. Сервис увеличивает количество экземпляров контейнеров при возрастании нагрузки и полностью удаляет запущенные экземпляры при ее отсутствии.

Классическим способом развертывания фронтенд-приложения остается размещение вебсервера на виртуальной машине, в большинстве случаев в виде Docker-контейнера. По сравнению с предыдущими способами развертывания процесс настройки виртуальной машины является наиболее трудозатратным и дорогим, но наиболее гибким. В дополнение к этому в качестве недостатка можно выделить, что масштабирование виртуальных машин более ресурсоемкое, а балансировка требует введения дополнительных элементов инфраструктуры — балансировщиков нагрузки и Instance Groups. Тем не менее, существуют и преимущества в виде возможности развертывания фронтенда, бэкенда, баз данных и других элементов вебприложения на одной виртуальной машине. Сервис виртуальных машин Yandex Compute Cloud предлагает оптимизированные для запуска Docker-контейнеров виртуальные машины (Container Optimized Image), которые позволяют увеличить производительность запущенных контейнеров.

Для проведения сравнительного исследования с помощью эксперимента в качестве ключевых показателей для сравнения были выбраны следующие характеристики:

- 1. Длительность отправки отражает время, затраченное клиентом на отправку данных серверу. Большие значения данной метрики могут свидетельствовать о сетевых проблемах между клиентом и сервером.
- 2. Длительность ожидания ответа от сервера показывает время, затраченное сервером перед началом ответа на запрос.
- 3. Длительность получения ответа определяет время, затраченное сервером на ответ клиенту.
- 4. Длительность запроса общее время, затраченное на выполнение HTTP-запроса.

В целом, оценка указанных характеристик позволяет оценить работоспособность и эффективность бессерверного приложения под нагрузкой. Это важно для обеспечения удовлетворения пользователей, минимизации времени отклика и обеспечения непрерывной работоспособности системы при высоких объемах трафика.

Методология экспериментального исследования представлена на рисунке. Предлагаемая методология охватывает три основных этапа:

- 1. Сборка приложения.
- 2. Подготовка инфраструктуры развертывания.
- 3. Тестирование.

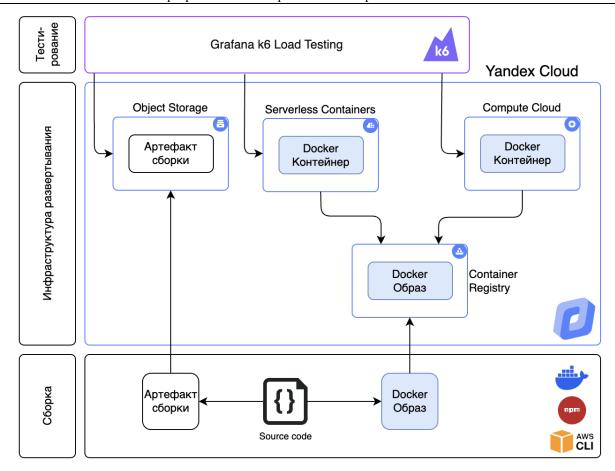


Рисунок. Методология проведения эксперимента

Этап сборки включает в себя разработку прототипа фронтенд-приложения с использованием библиотеки React. Проведение развертывания фронтенд-приложения требует предварительной сборки пакетными менеджерами. В данном эксперименте был использован NPM.

Этап подготовки инфраструктуры для развертывания включает в себя предварительную настройку инфраструктуры Yandex. Cloud и настройку инструмента нагрузочного тестирования Grafana K6 [5].

В случае использования Yandex Object Storage развертывание приложения требует предварительного созданного бакета для загрузки. Для данного варианта развертывания требуется загрузить артефакт сборки с бакета при помощи консольной утилиты AWS CLI и далее произвести первичную настройку веб-хостинга. Развертывание с помощью сервиса бессерверных контейнеров или виртуальной машины с docker-контейнером требуют создания docker-образа со сборкой фронтенд-приложения и загрузкой в реестр образов. В случае с бессерверными контейнерами, сервис требует хранения образа в реестре Yandex Container Registry, а в случае с виртуальной машиной такое расположение образа является рекомендацией, но влияет на скорость скачивания образа и, как следствие, запуска новой виртуальной машины при масштабировании.

Для проведения сравнительного исследования использовалась виртуальная машина внешнего по отношению к Yandex. Cloud облачного провайдера, с консольной утилитой Grafana K6, операционной системой Ubuntu 22.04.

В ходе эксперимента измерения были имитированы действия 5 пользователей на протяжении 10 секунд. Тестирование проведено вне внутренней сети Yandex.Cloud, что имитирует действия реальных пользователей. Результаты эксперимента представлены в таблице. В таблице представлены средние значения по каждому из показателей.

Таблица

Результаты эксперимента

Метрика/Концепция развертывания	Хостинг объектного хранилища	Бессерверный контейнер	Виртуальная машина с контейнером
Длительность отправки, мс	14.597	14.597	14.597
Длительность ожидания ответа, мс	0.06793	0.06793	0.06793
Длительность получения ответа, мс	0.04504	0.04504	0.04504
Общая длительность запроса, мс	71.37	71.37	71.37

Согласно результатам эксперимента, использование виртуальной машины демонстрирует уменьшение времени ответа на запросы пользователей, а также времени получения и отправки. Уменьшение данных показателей, а также оптимизация времени получения и отправки запросов позволяют сделать вывод, что для размещения веб-сайта предпочтительным в плане производительности является docker-container.

- 1. Yandex Object Storage. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cloud.yandex.ru/ru/docs/storage/ (дата обращения: 10.01.2024).
- 2. Scalability. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://en.wikipedia.org/wiki/Scalability#cite_note-1 (дата обращения: 12.01.2024).
- 3. Yandex Serverless Containers. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://cloud.yandex.com/en/docs/serverless-containers/ (дата обращения: 21.01.2024).
- 4. Cold Start in Serverless Computing: Current Trends and Mitigation Strategies. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/9191377 (дата обращения: 21.01.2024).
- 5. Grafana k6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://k6.io/blog/ways-to-visualize-k6-results/#key-metrics-to-visualize (дата обращения: 05.12.2023).

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В CLOUDSIM И KUBERNETES

Тихонов Л.А. 1 Научный руководитель — к.т.н. Перл И.А. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: tikhonov.lev0@gmail.com

Современные облачные вычисления предоставляют разнообразные инструменты для эффективного управления ресурсами и развертывания приложений [1]. В том числе это могут быть алгоритмы распределения виртуальных машин в той или иной среде. Но мы сосредоточимся на сравнении двух подходов к управлению ресурсами: распределение виртуальных машин с использованием CloudSim и распределение контейнеров в Kubernetes.

Ключевые слова

Cloudsim, kubernetes, devops, виртуальные машины, облачные вычисления.

В данном обзоре рассматриваются системы Cloudsim и Kubernetes. CloudSim выбран для обзора из-за его использования в университетской лаборатории, в то время как Kubernetes является широко известным опенсорс проектом, активно применяемым в IT компаниях.

CloudSim представляет собой инструмент симуляции, предназначенный для моделирования облачных ресурсов и среды эффективным образом, чтобы симуляцию можно было легко развернуть в реальном мире. Его многоуровневая передовая архитектура отличает его от других симуляторов, таких как iCanCloud, SimProject, CloudReports, используемых для моделирования облачной среды.

Сфера облачных вычислений также включает в себя среду моделирования, которая ориентирована на работу с виртуальными машинами [2]. Имеется возможность создания и оценки алгоритмов управления ресурсами в облачных средах. С учетом высокого уровня изоляции, обеспечиваемого виртуальными машинами, становится ключевым аспектом оптимизация распределения и эффективное использование вычислительных ресурсов.

На рисунке 1 и 2 представлены верхнеуровневые архитектуры интересующих нас компонентов для работы с параметрами алгоритмов распределения ресурсов виртуальных машин.

VmScheduler — это абстрактный класс, который определяет и реализует политику, используемую для распределения вычислительной мощности между виртуальными машинами, запущенными на определенном хосте. Иерархия классов планировщика виртуальных машин в cloudsim представлена на рисунке 1.

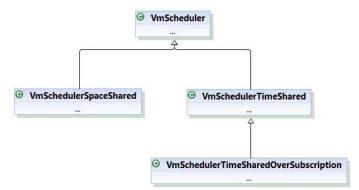


Рис. 1. Cloudsim Virtual Machine Scheduler. Иерархия классов

Эти классы могут быть расположены в пакете "org.cloudbus.cloudsim" пакета cloudsim. Определение этого абстрактного класса распространяется на следующие типы политик, реализованные в виде классов:

- VmSchedulerTimeShared: Этот класс реализует политику планирования ВМ, которая выделяет один или несколько элементов обработки для одной виртуальной машины и позволяет совместно использовать элементы обработки несколькими виртуальными машинами с заданным временным интервалом. Этот класс также учитывает накладные расходы на переключение распределения виртуальных машин (аналогично переключению контекста) при определении политики. Например, если виртуальная машина запрашивает четырехъядерный процессор, а выделенный хост имеет только двухъядерный, распределение будет неудачным.
- VmSchedulerSpaceShared: Этот класс реализует политику планирования BM, которая выделяет один или несколько элементов обработки для одной виртуальной машины, но эта реализация политики не поддерживает совместное использование элементов обработки (т. е. все запрошенные ресурсы будут использоваться выделенной BM до тех пор, пока BM не будет уничтожена). Кроме того, при такой политике распределения, если какая-либо виртуальная машина запрашивает элемент обработки, а он в это время недоступен, распределение не выполняется.
- VmSchedulerTimeSharedOverSubscription: это расширенная реализация политики планирования VMSchedulerTimeShared VM, которая позволяет виртуальной машине(ам) переподписывать элементы обработки (т. е. планировщик по-прежнему позволяет выделять виртуальные машины, которым требуется больше процессорной мощности, чем доступно. А такая переподписка приводит к снижению производительности.

На рисунке 2 представлена схема абстрактного класса CloudletScheduler. Он определяет базовый скелет для реализации политики планирования облаков для виртуальной машины.

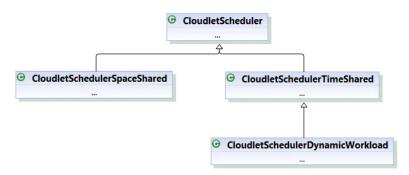


Рис. 2. Cloudlet Scheduler. Иерархия классов

Определение этого абстрактного класса расширяется до следующих типов политик, реализованных в виде трех отдельных классов в cloudsim:

CloudletSchedulerSpaceShared: Этот класс реализует политику планирования для виртуальной машины для выполнения задач в среде с общим пространством и только одна процедура будет выполняться на виртуальной машине в одно время. Это означает, что задачи разделяют одну и ту же очередь, а запросы обрабатываются по одному на каждое вычислительное ядро. Совместное использование пространства похоже на пакетную обработку.

CloudletSchedulerTimeShared: Этот класс реализует политику планирования облаков для виртуальных машин для выполнения процедур в среде с разделением времени это показывает, что на виртуальную машину будет подано более одного поручения, и каждый из них получит свою определенную долю времени. Это означает, что несколько запросов (облаков) обрабатываются одновременно, но они должны разделять вычислительную мощность этой виртуальной машины (путем имитации переключения контекста), поэтому они будут влиять на время обработки друг друга. В основном это влияет на время завершения работы облака в CloudSim. Разделение времени, вероятно, относится к концепции разделения вычислительной

мощности (например, CPU, логического процессора, GPU) и обычно известно как планирование по кругу.

CloudletSchedulerDynamicWorkload: реализует специальную политику планирования для виртуальных машин, предполагая, что существует только один cloudlet, который работает как онлайн-сервис с различными требованиями к рабочей нагрузке в соответствии с потребностями пиковой/непиковой нагрузки пользователей в определенный период времени.

Примеры алгоритмов, используемых в CloudSim, включают First Come First Serve (FCFS), Round Robin, Best Fit, Worst Fit и другие. Эти алгоритмы могут быть выбраны и настроены в зависимости от требований и характеристик конкретного облачного сценария [3].

Платформа Kubernetes — это открытое программное обеспечение, предназначенное для автоматизации развертывания, масштабирования и управления контейнерными приложениями. Её особенность заключается в том, что она позволяет разработчикам сосредоточиться на создании и развертывании своих приложений, не отвлекаясь на управление базовой инфраструктурой. Для работы над приложениями Kubernetes использует декларативный подход: пользователи указывают желаемые состояния приложения, а система поддерживает их. Также платформа предоставляет надежные инструменты для мониторинга и управления ресурсами, включая механизмы самовосстановления для автоматического обнаружения и восстановления отказов. В целом, Kubernetes является мощным и гибким решением для управления контейнерными приложениями в производственных средах.

За последние годы область алгоритмов планирования Kubernetes стала объектом увеличивающегося внимания исследователей и практиков [4, 5]. В литературе все чаще рассматриваются потенциальные преимущества и проблемы использования различных алгоритмов планирования с целью оптимизации производительности кластеров. Важной темой, подчеркиваемой во многих исследованиях, является необходимость эффективного планирования рабочих нагрузок в облачной среде. Ограничения традиционных подходов к планированию вычислительных ресурсов в кластере Kubernetes становятся все более очевидными, поскольку они не способны справиться со сложной и динамичной природой рабочих нагрузок. В результате растет интерес к использованию передовых алгоритмов планирования, способных эффективно распределять вычислительные ресурсы в кластере.

Помимо этого, акцентируется значимость улучшенных алгоритмов планирования для Kubernetes, которые могут оптимизировать использование ресурсов, сократить временные задержки и повысить производительность кластера. Эти алгоритмы также способны облегчить разработку новых приложений и сервисов в среде Kubernetes, включая аналитику в реальном времени, машинное обучение и глубокое обучение. Система использует внутренние компоненты для контроля ресурсов на всех уровнях, такие как Kubernetes scheduler, контроллер ресурсов, политики приоритета и автомасштабирование.

В литературе отмечаются не только потенциальные преимущества, но и ряд проблем и ограничений алгоритмов планирования Киbernetes. Одной из ключевых проблем является необходимость учета меняющегося характера рабочих нагрузок и приложений в кластере. Для решения этого вопроса различные авторы сосредоточились на улучшении функции автомасштабирования в планировании Kubernetes. Это позволит обеспечить автоматическую корректировку ресурсов, выделяемых стручкам, в зависимости от текущего спроса. Кроме того, среди других проблем стоит выделить необходимость управления и координации нескольких алгоритмов планирования, а также обеспечение стабильности и производительности всей системы. В целом, литературные данные свидетельствуют о том, что усовершенствованные алгоритмы планирования предлагают перспективное решение проблем, связанных со сложным и динамичным характером рабочих нагрузок в кластере Kubernetes. Тем не менее, необходимы дальнейшие исследования для устранения ограничений и проблем, связанных с этими алгоритмами, а также для изучения их потенциальных применений и преимуществ.

В работе Santos et al. [6] для развертывания в "умных" городах авторы предлагают метод планирования с учетом сетевых особенностей для приложений на основе контейнеров. Их стратегия применяется на практике в качестве дополнения к встроенной по умолчанию системе

планирования Kubernetes, которая представляет собой оркестратор с открытым исходным кодом для автоматического управления и развертывания микросервисов. Используя контейнерные приложения для "умного города", авторы оценили эффективность предложенного подхода к планированию и сравнили его со встроенным механизмом планирования Kubernetes по умолчанию. По сравнению со стандартной методикой, предложенное решение снижает сетевую задержку почти на 80%.

В работе Chung et al. [7] авторы предлагают новый кластерный планировщик под названием Stratus, специализированный для организации пакетного выполнения заданий на виртуальных кластерах в публичных платформах Infrastructure-as-a-Service (IaaS). Stratus фокусируется на минимизации долларовых затрат путем агрессивной упаковки заданий на машины на основе оценки времени выполнения, то есть для экономии средств выделенные ресурсы будут либо заполнены, либо пустые, чтобы затем их можно было освободить. Используя трассировки рабочих нагрузок от TwoSigma и Google, авторы оценили Stratus и установили, что предложенный Stratus снижает затраты на 17–44% по сравнению с эталонами планирования виртуальных кластеров.

В работе Townend et al. [8] авторы предлагают целостную систему планирования для Kubernetes, которая заменяет стандартный планировщик и учитывает как программные, так и аппаратные модели для повышения эффективности центра обработки данных.

Авторы утверждают, что, внедрив аппаратное моделирование в программное решение, интеллектуальный планировщик может значительно повысить эффективность ЦОД.

При первоначальном внедрении авторы наблюдали снижение энергопотребления на 10–20%.

В работе Ogbuachi et al. [9] авторы предлагают улучшенный дизайн для планирования Kubernetes, который учитывает физические, операционные и сетевые параметры в дополнение к программным состояниям, чтобы обеспечить лучшую оркестровку и управление приложениями для граничных вычислений. Они сравнивают предложенный дизайн с планировщиком Kubernetes по умолчанию и показывают, что он обеспечивает улучшенную отказоустойчивость и возможности динамической оркестровки.

Выводы. В данной работе был осуществлен обзор и анализ инструментов по работе с инфраструктурой реальных серверов в ЦОД, приведены примеры из литературы.

Было выявлено, что оба подхода имеют свои преимущества и недостатки, и выбор между ними зависит от конкретных требований приложения или запроса заказчика. CloudSim подходит для сценариев, где требуется высокая изоляция, в то время как Kubernetes обеспечивает более легковесное и гибкое управление ресурсами. Эффективное использование обоих подходов зависит от того, насколько хорошо они соответствуют уникальным требованиям проекта в облачной среде.

- 1. Тутов А.В., Тутова Н.В., Ворожцов А.С. Моделирование процессов распределения ресурсов в облачных центрах обработки данных // Т-Соmm: Телекоммуникации и транспорт. 2017 Т.11. №. 4 С. 76–80.
- 2. Calheiros R., Ranjan R., Beloglazov A., Buyya R. CloudSim: a toolkit for modeling and simulation of cloud computing environments and evaluation of resource provisioning algorithms. // Software: Practice and Experience. 2011. 41. Pp. 23–50.
- 3. Satish Kumar Srivastava, Kumar Rangasamy. Priority Based Resource Scheduling Algorithm in CloudSim. // International Journal of Science and Research 2014 V.3 №. 4. Pp. 312–315.
- 4. Senjab K., Abbas S., Ahmed N. A survey of Kubernetes scheduling algorithms. // J Cloud Comp $12 2023 N_{\odot}$. 87. DOI: 10.1186/s13677-023-00471-1.
- 5. Руководство по Kubernetes. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://kubernetes.io/docs/concepts/configuration/manage-resources-containers обращения: 29.10.2023). (дата
- 6. Santos J., Wauters T., Volckaert B., De Turck F. Towards network-Aware resource provisioning

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Программная инженерия и компьютерные технологии

- in kubernetes for fog computing applications. // Proceedings of the IEEE Conference on Network Softwarization: Unleashing the Power of Network Softwarization. 2019 Pp. 351–359.
- 7. Chung A., Park J.W., Ganger G.R. Stratus: Cost-aware container scheduling in the public cloud. // Proceedings of the ACM Symposium on Cloud Computing. 2018. Pp. 121–134.
- 8. Thinakaran P., Gunasekaran J.R., Sharma B., Kandemir M.T., Das C.R. Kube-Knots: Resource Harvesting through Dynamic Container Orchestration in GPU-based Datacenters. Proceedings // IEEE International Conference on Cluster Computing, ICCC 2019. DOI: 10.1109/CLUSTER.2019.8891040.
- 9. Ogbuachi M.C., Gore C., Reale A., Suskovics P., Kovacs B. Context-aware K8S scheduler for real time distributed 5G edge computing applications. // 27th International Conference on Software, Telecommunications and Computer Networks, SoftCOM. 2019. DOI: 10.23919/SOFTCOM.2019.8903766.

ОЦЕНКА МЕТОДОВ ДИСТИЛЛЯЦИИ ДИФФУЗИОННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Хаяров Э.А.¹ (студент)

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Муромцев Д.И.1

1 – Университет ИТМО

e-mail: eldarkhayarov@gmail.com

В работе рассмотрены способы оптимизации работы моделей диффузионных нейронных сетей посредством обучения моделей (дистилляции), генерирующих изображения за меньшее число итераций. В целях упрощения процесса экспериментирования был выбран датасет CIFAR-10, основываясь на гипотезе о том, что порядок методов дистилляции по эффективности сохранится и на больших по размеру моделях. Была оценено качество генерации изображений дистиллированных моделей посредством сравнения сгенерированных изображений с эталонными.

Ключевые слова

Генеративные нейронные сети, диффузионные нейронные сети, дистилляция, оптимизация нейронных сетей, прогрессивная дистилляция, согласованная дистилляция.

Диффузионные нейронные сети являются представителями генеративных моделей, используемых для создания уникальных изображений. Такие нейронные сети основаны на методе обратной диффузии, который получил широкое применение в задачах генерации изображений в последние годы. GAN (Generative Adversarial Networks) является другим распространённым видом моделей, предназначенных для решения похожих задач. В качестве основного преимущества диффузионных моделей перед GAN, среди прочих, можно выделить высокую степень гибкости к пожеланиям пользователей. Однако диффузионные модели также имеют свои недостатки перед GAN, главным из которых является медленная генерация изображений из-за итеративного характера оного процесса. Качественная генерация изображения из случайного случая требует нескольких последовательных итераций, выходное изображение каждой из них подаётся на вход последующей. Для решения этих проблем разрабатываются методы оптимизации, которые сводятся к идее создания новой модели «ученика», которая будет генерировать за одну итерацию схожего по качеству генерации изображения, как результаты работы за несколько итераций исходной модели, именуемой «учителем».

Для дистилляции применялись методы прогрессивной дистилляции (Progressive distillation) и согласованной дистилляции (Consistency distillation) [1, 2]. Рассматривался метод дистилляции знаний (Knowledge distillation), но он был отвергнут из-за архаичности и низких значений метрик.

Принцип работы прогрессивной дистилляции представляет из себя цикличный процесс обучения: если для генерации итогового изображения модели «учителю» требуется п итераций, то на каждом этапе цикла обучения модель «ученик» приспосабливается на каждой i-й итерации функционировать так же, как модель «учитель» генерирует на двух соседних итерациях i и i+1; затем получившееся модель объявляется «учителем», а количество итераций n сокращается в два раза. Дистилляция завершается, когда n принимает значение 1. Иллюстрация описанного процесса представлена на рисунке.

Метод согласованной дистилляции предполагает обучение согласованной модели (Consistency model) с использованием исходной модели.

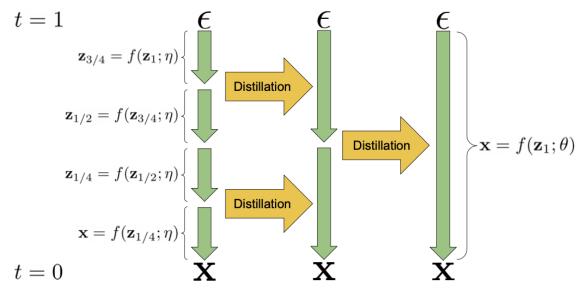


Рисунок. Иллюстрация процесса прогрессивной дистилляции

Существуют несколько метрик, предназначенных для оценки качества генерации изображений. В рамках этой работы применялись Inception Score (IS) и Fréchet inception distance (FID).

Для реализации процесса сравнения было необходимо собрать датасет, состоящий из изображений. Для упрощения процесса был выбран один из распространённых существующих датасетов. При выборе выдвигались следующие требования:

- наличие загрузчика, поддерживаемого РуТогсh;
- разрешение изображений не должно превышать 128×128 пикселей;
- большое количество цитирований в публикациях за 2023 год.

Первое требования обосновывается удобностью использования, второе требование обусловлено высокой скоростью обучения, третье требование обусловлено высокой степенью доступности значений метрик других моделей. Рассматривались датасеты CIFAR-10, ImageNet, MS COCO [3, 4, 5]. Сравнение представлено в таблице 1.

Сравнение датасетов для поведения тестирования

Таблица 1

Название датасета	CIFAR-10	ImageNet	MS COCO
Количество изображений	60000	14197122	328000
Аннотирование	10 классов	WordNet иерархия	Сегменты с 80 классами, описания картинок на естественном
Библиотеки, с которыми совместимы доступные загрузчики	PyTorch, TensorFlow, JAX	PyTorch, TensorFlow, JAX	языке и пр. PyTorch, TensorFlow, JAX
Доступные разрешения в загрузчиках, пикс.	32×32	Различные, в зависимости от загрузчика Среднее – 469х387	640×480
Количество цитирований в публикациях за 2023 год	2841	2880	2393

Для тестирования использовались фотографии из CIFAR-10 в силу их низкого разрешения изображений, следовательно, низкой вычислительной сложности процесса дистилляции. Были

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Программная инженерия и компьютерные технологии

обучены дистиллированные модели с применением методов Progressive distillation и Consistency distillation. Значения метрик представлены в таблице 2.

Таблица 2

Значения метрик

Модель	Датасет	IS	FID
Базовая модель	CIFAR-10	9,37	3,28
Прогрессивная дистилляция	CIFAR-10	8,53	3,95
Согласованная дистилляция	CIFAR-10	9,29	3,67

Модель, полученная методом согласованной дистилляции, демонстрирует значения метрик, соответствующие более высокому качеству генерации изображений, относительно качества генерации модели, полученной при использовании прогрессивной дистилляции. Согласованная дистилляция превосходит более ранние методы дистилляции, поэтому рекомендуется к использованию в качестве базового метода дистилляции. В дальнейшем планируется реализация дистилляции моделей, предназначенных для генерации человеческих лиц в удовлетворительном разрешении.

- 1. Tim Salimans, Jonathan Ho Progressive Distillation for Fast Sampling of Diffusion Models. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2202.00512.pdf (дата обращения: 10.01.2024).
- 2. Yang Song, Prafulla Dhariwal, Mark Chen, Ilya Sutskever Consistency Models. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/pdf/2303.01469.pdf (дата обращения: 10.01.2024).
- 3. CIFAR-10. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://paperswithcode.com/dataset/cifar-10 (дата обращения: 10.01.2024).
- 4. ImageNet. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://paperswithcode.com/dataset/imagenet (дата обращения: 10.01.2024).
- 5. MS COCO. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://paperswithcode.com/dataset/coco (дата обращения: 10.01.2024).

ОБЗОР МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕКИНГА ВЗГЛЯДА ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАБОТЫ РЕНТГЕНОЛОГА

Художников Н.С.¹ (студент) Научный руководитель – к.пед.н., доцент Авксентьева Е.Ю.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: khudozhnikovnikita@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623106 «Исследование методов и программных средств интеллектуальной диагностики в медицине».

В работе рассматривается одно из перспективных направлений в области интеллектуальной диагностики в медицине, а именно методы и технические средства трекинга взгляда для мониторинга работы рентгенолога, необходимые для оптимизации диагностических процессов в медицинской практике, поскольку современные требования к точности и эффективности медицинской диагностики приводят к необходимости обработки большого объема сложной визуальной информации.

Ключевые слова

Интеллектуальная диагностика, трекинг взгляда, мониторинг работы, медицина, визуальная информация.

Согласно отчету «Федеральной службы государственной статистики», наблюдается увеличение количества заболеваний органов дыхания и патологий связанных с появлением новообразований, что является проблемой в современных условиях, поскольку медицинские изображения, полученные с использованием рентгеновских технологий, приводят к необходимости обработки большого объёма сложной визуальной информации.

В большинстве случаев процедуру анализа снимков выполняет врач рентгенолог, используя при этом простой набор инструментов, такая схема довольно проста, но требует много времени и большое количество внимания и опыта врача. На примере определения патологий в легких традиционный метод диагностики по рентгеновскому снимку основывается на поиске и оценивании специалистом характерных для конкретной патологии признаков. Во время проведения этой процедуры врач придерживается определённой последовательности действий, которая состоит из нескольких этапов, что также говорит о том, что методика визуального поиска и анализа является трудоемкой, требует высокой квалификации специалиста, а зачастую в условиях ограниченного времени может привести к диагностическим ошибкам. С развитием компьютерных технологий стали появляться специализированные цифровые и программные технологии, которые позволяют упростить или автоматизировать работу врача рентгенолога, а также снизить уровень ошибок, которые могут быть вызваны утомлением врача или другими субъективными факторами.

Одним из перспективных направлений в этой области является трекинг взгляда, поскольку современные требования к точности и эффективности медицинской практики, а также возросший объем информации, требуют новых решений для оптимизации этих процессов. Еуе Tracking — метод, который определяет координаты взора человека: точки пересечения оптической оси глазного яблока и плоскости экрана, на котором находится объект. В контексте работы врача рентгенолога такая технология может применяться для улучшения интерпретации рентгеновских изображений путём фиксирования точек фокусировки внимания врача. Благодаря технологии трекинга повышается точность и эффективность диагностического процесса, что сокращает время, необходимое для диагностики, поскольку врач может более

оперативно анализировать рентгеновские снимки. Также трекинг взгляда позволяет выявлять моменты уменьшения внимания или утомления, что в свою очередь может служить основой для оптимизации рабочего графика или предоставления дополнительного времени отдыха, что также является важным аспектом, поскольку качество решений, принимаемых врачами, напрямую зависит от их состояния.

Для достижения наибольшей точности чаще всего используются специальные высокоточные инфракрасные камеры или же специальные комплексы, которые позволяют удерживать голову пользователя в неподвижном положении, что также положительно сказывается на точности трекинга. Один из таких комплексов – установка iView X Hi Speed 1250/200 [1]. Установка предназначена для высокоточной регистрации движения глаз в инфракрасном диапазоне и состоит из регистрирующей камеры, источника инфракрасного света, стойки с упором для головы и монитора для представления графических объектов. В данном случае голова пользователя фиксируется с помощью специальных приспособлений, что позволяет добиться высокой точности трекинга, однако даже в этом случае существуют и другие внешние факторы, которые могут исказить действительную картину. Например, использование средств коррекции зрения или нанесение макияжа для глаз может повлиять на результат трекинга. Стоит отметить, что такие технические средства обладают высокой стоимостью, требуют точной и регулярной настройки. Кроме того, трудно представить врача рентгенолога, который часами изучает рентгеновские снимки с зафиксированной в специальном устройстве головой. Все перечисленные факторы отрицательно влияют на повсеместное использования таких устройств в работе врачей рентгенологов.

Существуют более мобильные устройства трекинга взгляда, например специальные очки, сравнение которых приведено в статье «Assessing the Data Quality of AdHawk MindLink Eye-Tracking Glasses» [2]. В тестировании принимал участие 21 человек. Устройства, используемые в эксперименте: очки MindLink, очки SMI 2, очки Tobii Pro 2, устройство EyeLink Portable Duo.

Технические характеристики устройств представлены в таблице.

Таблица

Таблица технических характеристик

		TOXIIII ICOMIX XUP	<u> </u>	
	MindLink	SMI 2	Tobii	EyeLink
Диапазон отслеживания	40x25°	80x60°	-	32x25°
Частота	500 Гц	120 Гц	100 Гц	2000 Гц
Точность отслеживания	1°	0,5°	-	От 0,25° до 0,5°
Камера	Угол обзора — 82°	Угол обзора — 60°	Угол обзора — 82°	-
Данные	Можно получить через USB кабель	Можно получить через USB кабель	Записываются с помощью специального устройства	-
Bec	23 грамма	68 грамм	45 грамм	-

Тесты проводились в тихой лаборатории с плотными шторами и одинаковым количестве света, температура в помещении поддерживалась в районе 25 градусов. Такие условия необходимы для объективной оценки устройств. Процедура тестирования заключалась в том, что специальная мишень появлялась в разных местах экрана и участник должен зафиксировать на ней внимание. Область появления мишени примерно соответствовала диапазону отслеживания каждого из испытываемых технических средств.

В результате эксперимента наилучшую точность показали очки Tobii Pro 2, второе место заняли очки SMI 2, MindLink занял третье место. Результат испытания на различных дистанциях представлен на рисунке 1.

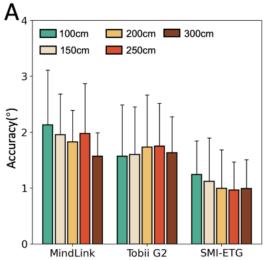


Рис. 1. Результат испытания на дистанции

Точность каждого из рассматриваемых устройств представлена на рисунке 2.

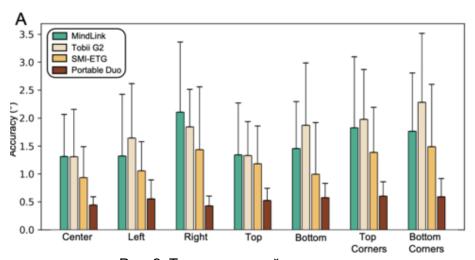


Рис. 2. Точность устройств трекинга

Очки для трекинга обладают серьезным преимуществом перед комплексами, использующими инфракрасные камеры. Они выигрывают в мобильности, обладают достаточно высокой точностью, но всё еще присутствует проблема высокой стоимости такого оборудования, а также необходимость специальной настройки.

Помимо использования специальных дорогостоящих устройств, трекинг взгляда может осуществляться с помощью программных средств. В статье «Best low-cost methods for real-time detection of the eye and gaze tracking» [3] предложены методы для осуществления трекинга взгляда путём программного обеспечения и не требующие покупки специализированных устройств. Одним из методов отслеживания взгляда авторы представили использование сверточной нейронной сети. Для обучения использовали набор данных Gaze Capture, который содержит изображения глаз и соответствующие данные о направлении взгляда. То есть каждое изображение в датасете сопровождается данными о точном направлении взгляда человека.

Следующим методом для реализации трекинга взгляда авторы описывают использование каскадного классификатора Хаара, использование которого позволяет определять координаты объектов и обнаруживать лица. В таком случае, на первом этапе изображение разбивается на окна различных размеров и форм, которые называются хааровыми признаками. Эти признаки представляют собой разности интенсивностей пикселей в двух областях изображений, что позволяет выделить характерные черты, которые могут указывать на наличие глаз или любого другого искомого объекта. Затем, для обучения классификатора, используется набор

изображений с размеченными глазами и фоновыми областями. Классификатор обучается на основе этих данных, настраивая параметры таким образом, чтобы эффективно различать области с глазами от фоновых. В каскадном подходе, при использовании метода Хаара для трекинга взгляда, классификаторы структурируются последовательно в виде каскада. Каждый последующий классификатор в каскаде обладает более высоким уровнем сложности и активируется только в случае, если предыдущие классификаторы обнаружили потенциальное присутствие глаз. Эта организация в каскад формирует иерархическую структуру, где каждый уровень классификаторов фильтрует области изображения, сужая область дальнейшего анализа. Такой подход способствует ускорению процесса обнаружения объектов и сокращению количества областей, требующих более подробного и сложного анализа. Таким образом, метод Хаара в контексте трекинга взгляда через каскадный подход обеспечивает эффективное и быстрое выделение областей с глазами на изображении, используя характерные признаки и систему уровневого фильтрования в виде каскада классификаторов.

В качестве еще одного метода трекинга взгляда авторы рассматривали метод извлечения ориентиров лица, такие как: использование библиотеки dlib, использование лицевой сетки MediaPipe, функции EAR.

Библиотека dlib для C++ предоставляет средства для трекинга взгляда, используя методы извлечения ориентиров на лице. Процесс начинается с использования предварительно обученной модели для точной детекции лица на изображении или в видеопотоке, а затем определяет ключевые точки на лице, что позволяет определить, куда направлен взгляд. Особенностью библиотеки является способность отслеживать ключевые точки во времени.

МеdiaPipe — библиотека, созданная компанией Google, предоставляет средства для трекинга взгляда, в том числе с использованием лицевой сетки. Обнаружение лица осуществляется с помощью глубокой нейронной сети, предварительно обученной на большом количестве данных. После обнаружения лица происходит определение ключевых точек лица, таких как углы глаз, носа и рта. Затем, основываясь на данных о положении ключевых точек и их динамике, лицевая сетка вычисляет направление взгляда. В качестве преимуществ MediaPipe стоит выделить относительную точность детекции и трекинга лица.

Функция EAR, то есть «Eye aspect ratio» основана на геометрических параметрах глаза и позволяет определить степень его открытости. На первом этапе выбираются ключевые точки глаза, например: углы глазных век и внутренний и внешний углы глаза. Затем с помощью выбранных точек определяются длины двух отрезков. Один соединяет внешний и внутренний углы глаза, а второй верхний и нижний углы, что позволяет определить степень открытости глаза. Когда глаз открыт, EAR близка к верхнему пороговому значению, когда закрыт — значение стремится к 0. Определить направление взгляда можно путём мониторинга изменений EAR во времени. Резкое изменение EAR может говорить о моргании, а медленное уменьшение может свидетельствовать об усталости и закрытии глаз. Однако для эффективной работы этого метода может потребоваться интеграция других алгоритмов, то есть EAR может использоваться как часть системы трекинга взгляда.

В результате анализа предложенных методов авторы статьи [3] «Best low-cost methods for real-time detection of the eye and gaze tracking» представили таблицу, в которой метод MediaPipe показал точность 98,77%, метод хаара показал точность 93,06%, а метод EAR показал точность 89,2%.

Каждый из рассмотренных методов имеет свои достоинства и недостатки и выбор метода зависит от конкретной задачи, особенно в контексте мониторинга работы рентгенолога. На выбор метода также влияют такие факторы как: точность, простота интеграции, доступность библиотек и требования к оборудованию. Также стоит отметить, что все представленные методы не будут обладать такой высокой точностью, как специально разработанное оборудование, предназначенное для трекинга в рамках медицинских практик. Однако каждый из представленных методов может использоваться в контексте различных задач, главным аспектом при выборе может стать его стоимость, поскольку представленные методы однозначно дешевле, чем специализированное оборудование.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Программная инженерия и компьютерные технологии

В дальнейшем планируется исследовать методы снижения стоимости программных средств для трекинга, например, за счёт оптимизации алгоритмов или использования открытых библиотек, что позволит более широко внедрять такие технологии в медицинскую практику и повысить доступность диагностики.

- 1. Демидов А.А., Жегалло А.В. Оборудование SMI для регистрации движений глаз: тестдрайв // Экспериментальная психология. 2008. Т. 1. С. 149–159.
- 2. Zehao Huang, Xiaoting Duan, Gancheng Zhu. Assessing the Data Quality of AdHawk MindLink Eye-Tracking Glasses // Behavior Research Methods. 2024. Pp. 2–34. DOI: 10.3758/s13428-023-02310-2.
- 3. Amal Hameed Khaleel, Thekra H., Abbas Abdul-Wahab Sami Ibrahim. Best low-cost methods for real-time detection of the eye and gaze tracking // i-com. 2024. Pp. 2–16. DOI: 10.1515/icom-2023-0026.

УДК 004.89; 159.9.07

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ

Цыгляев В.М.¹ (студент) **Научный руководитель** – к.т.н. **Русак А.В.**¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: vladislav.czyglyaev.01@mail.ru

В работа рассматривается возможность применения методов машинного обучения для определения психологических свойств личности по информации, полученной из личных страничек пользователей социальных сетей. Анализируется связь личностных качеств с конкретными данными из профилей социальных сетей и оценивается точность различных алгоритмов в прогнозировании характеристик личности. Также приводятся рекомендации по использованию личностных моделей в зависимости от целей исследования.

Ключевые слова

Social mining, анализ данных социальных сетей, диагностика психологических свойств личности, большая пятерка личностных качеств, модель HEXACO.

Социальные сети стали неотъемлемой частью современной цифровой жизни, и многие люди делятся в Интернете большим количеством информации, демонстрируют свое мнение, интересы и характер. Данную информацию возможно интерпретировать в сведения о личностных качествах, которые, в свою очередь, можно использовать в различных областях.

Так, современный рекрутинг сталкивается с проблемой выбора наиболее подходящих кандидатов для определенной должности, а традиционные методы оценки, такие как резюме и собеседования, не всегда дают полную картину о личности претендента. Это может приводить к ошибочным решениям при выборе кандидатов и негативно сказываться на бизнесе.

Социальные сети, в свою очередь, могут помочь в оценке личности и способностей, предоставляя статистику и информацию о поведении и взаимодействии людей. Однако эти данные могут быть сложными для интерпретации, поэтому необходимы методы, которые могут автоматически анализировать информацию и выявлять паттерны, связанные с психологическими свойствами личности.

Так, среди наиболее распространенных моделей личности в психологии можно выделить пятифакторную, шестифакторную и семифакторную модели. Пятифакторная модель, обычно называемая моделью «Большой пятерки», охватывает фундаментальные черты личности: экстраверсию, доброжелательность, добросовестность-сознательность, нейротизм и открытость опыту. Модель НЕХАСО, шестифакторная модель, вводит дополнительную черту — честность-смирение. В дальнейшем семифакторная модель включает в структуру «Большой пятерки» два дополнительных фактора — «положительную валентность», состоящую из оригинальности, утонченности, благородности, и «отрицательную валентность», состоящую из опасности, злости и коварности.

Выбор личностной модели зависит от целей и задач исследования:

- пятифакторная хорошо подходит для описания основных черт личности и может быть использована для прогнозирования поведения и решения бизнес-задач;
- шестифакторная модель, в свою очередь, может быть полезна в исследованиях, связанных с этикой и моралью, так как она включает в себя черту честности/скрупулезности;
- семифакторная же модель может быть полезна для исследований, связанных с агрессивностью и конфликтами. Данная модель может помочь определить, какие люди более склонны к агрессивному поведению и какие факторы влияют на это поведение.

Для определения личностных характеристик по данным моделям исследуют и обрабатывают различные объекты из социальных сетей, которые конвертируются в конкретные признаки [1]. Так, одним из объектов исследования, влияющих на оценку персональных личностных качеств, являются данные профиля пользователя. Данные из профиля представляют собой всю информацию, которую указывает о себе пользователь, начиная от даты рождения с городом проживания и заканчивая политическим и религиозным предпочтениями.

Однако список используемых данных с профиля может меняться в зависимости от рассматриваемой социальной сети. Например, в крупнейшей сети профессиональных контактов LingedIn можно закодировать целых 33 признака, которые отличаются от признаков, полученных из данных профилей классических социальных сетей [2].

Вместо стандартный признаков появляются следующие показатели:

- наличие рекомендаций от других пользователей;
- наличие волонтерской активности;
- количество навыков;
- наличие социальных навыков;
- наличие сертификатов;
- наличие креативности и т. д.

Каждый из этих признаков по-своему связан с конкретной чертой модели личности. Например, шесть показателей LinkedIn отражают открытость к опыту. Это наличие художественной фотографии, креативность, количество языков, социальная ответственность, художественная деятельность и количество влиятельных лиц. Тем не менее, важно отметить, что некоторые из этих признаков могут влиять и на другие черты личности. Например, добросовестные, экстравертные и эмоционально стабильные люди более склонны делиться художественными фотографиями. Те, кто участвует в социально ответственных действиях, обычно демонстрируют более высокий уровень доброжелательности. Кроме того, количество влиятельных лиц тесно связано с экстраверсией, как и с открытостью опыту.

Тремя основными показателями, связанными с доброжелательностью, являются улыбка, командная работа и волонтерство. Эти же три показателя также показывают корреляцию с добросовестностью.

Также было обнаружено, что семь показателей в значительной степени связаны с экстраверсией. К ним относятся количество связей, взаимодействие между людьми, участие в спортивных мероприятиях, занятие руководящих должностей, размещение дополнительных фотографий, обладание различными навыками и проявление лидерских качеств. Примечательно, что четыре показателя экстраверсии в LinkedIn демонстрируют отрицательную корреляцию с невротизмом. Это говорит о том, что эмоционально стабильные люди более склонны заниматься физическими упражнениями, делиться дополнительными фотографиями в своем профиле, демонстрировать более широкий спектр навыков и сообщать о лидерстве как о навыке по сравнению с людьми с более высоким уровнем невротизма.

Для добросовестности задаются 11 показателей LinkedIn. Причем определенные параметры добросовестности также связаны с характеристиками, выходящими за рамки добросовестности. Например, люди, которые составляют резюме, часто демонстрируют более высокий уровень экстраверсии и более низкий уровень невротизма. Те, кто подробно описывает свой опыт, обычно проявляют большую доброжелательность, в то время как люди, которые часто обновляют свои профили, как правило, более экстравертны.

Еще одним параметром является активность пользователя. Частота и регулярность активности пользователя в социальной сети могут указать на его уровень общительности, социальной активности и интереса к определенным темам. Активность в основном представляется репостами, которые принимают вид специальной матрицы, построенной на методе, схожим с мешком слов. Текст комментариев и постов могут дать представление о характере, психологическом состоянии автора. Например, если пользователь часто оставляет текст, состоящий из слов с заглавными буквами и из большого количества восклицательных знаков, то это говорит об агрессии.

Для анализа содержание комментариев и постов преобразуются в один единый текст, который затем конвертируется в психолингвистические маркеры, словари и N-граммы. Все это позволяет оценить тональность слов, выявить агрессию и определить психолингвистические индексы.

Музыка, которую слушает пользователь, представляется в виде жанров и количества песен, относящихся к определенному жанру. Эта информация также может отражать настроение, характер и интересы [3]. Например, существует сильная корреляция между открытостью к опыту и предпочтением популярной музыки и современных хитов. И наоборот, поклонники андеграундной музыки и шансона, как правило, имеют более низкий уровень открытости к опыту. Люди с низкими показателями «открытости к опыту» обычно имеют узкий выбор любимых песен и мало заинтересованы в расширении своих музыкальных предпочтений.

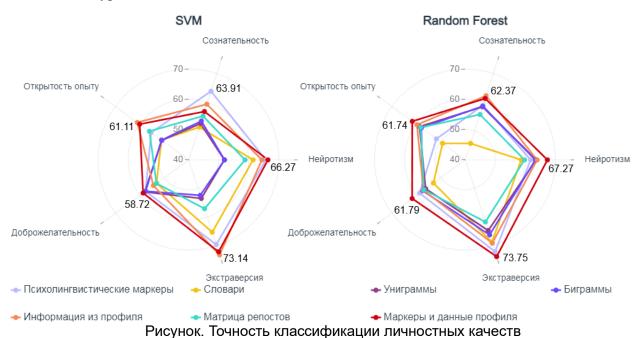
Изображения, которые выкладывает пользователь, могут дать представление о его жизненном стиле, интересах и увлечениях. Личность в основном же определяется из того, каким изображениям был поставлен «лайк». При этом во время оценки изображение разбивается на конкретные признаки: цвет, композиция, текстурные свойства, лица и т. д. [4].

Все эти признаки можно совмещать или же использовать по отдельности вместе с различными методами машинного обучения, что влияет на точность результата диагностики личности.

По данной тематике можно использовать множество методов машинного обучения, начиная от логистической регрессии и заканчивая нейронными сетями.

Для анализа данных из профилей, активности и текста в основном применяются методы классификации: наивный Байес, метод опорных векторов с использованием ядра радиальной базисной функции, дерево решений, нейронная сеть.

Так, согласно рисунку, алгоритм случайного леса показывает высочайшую точность определения уровней невротизма, экстраверсии, доброжелательности и открытости опыту путем анализа сочетания психолингвистических маркеров и профилей пользователей, а метод опорных векторов с использованием психолингвистическими маркеров дает наибольшую точность для уровней сознательности.



Также для прогнозирования и классификации личности по модели Большой Пятерки применяются модели, основанные на глубоком обучении и обработке естественного языка с помощью предварительно обученных языковых моделей, а именно Elmo, ULMFiT и BERT [5]. Причем точность использования таких моделей выше, чем у классических методов машинного обучения.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Программная инженерия и компьютерные технологии

Так, данный подход достигает точности в 61,85% в наборе данных «Essays Dataset», превосходя предыдущие результаты примерно на 1,25%. Кроме того, метод демонстрирует точность 73,91% на наборе данных «myPersonality», что превышает предыдущий результат на 3,12%.

В данной работе были рассмотрены методы диагностики психологических свойств личности на основе данных социальных сетей, которые позволяют получать данные о личности пользователя в режиме онлайн и анализировать их с помощью алгоритмов машинного обучения.

Однако, существуют ограничения в использовании данных социальных сетей. Например, пользователи могут предоставлять искаженную информацию, выдавая себя за кого-то другого или скрывая свои истинные эмоции и предпочтения. Кроме того, имеются ограничения, связанные с обработкой персональных данных, которые регулируются законами.

Несмотря на это, перспективы использования данных методов остаются высокими. Их использование может помочь улучшить качество отбора кандидатов на работу, хоть и требует достаточной сложной обработки разнородных данных.

Список используемых источников

- 1. Станкевич М.А., Игнатьев Н.А., Смирнов И.В., Кисельникова Н.В. Выявление личностных черт у пользователей социальной сети Вконтакте // Вопросы кибербезопасности. 2019. № 4. С. 29–36.
- 2. Fernandez S., Stöcklin M., Terrier L., Kim S. Using available signals on LinkedIn for personality assessment // Journal of Research in Personality. 2021. Vol. 93. P. 14.
- 3. Филатов А.В. Заметки профайлера / А. В. Филатов. Москва: Издательские решения, $2019.-522~{\rm c}.$
- 4. El-Demerdash K., El-Khoribi R.A., Mahmoud A., Shoman I., Abdou S. Deep learning based fusion strategies for personality prediction // Egyptian Informatics Journal 2022. Vol. 23. Pp. 47–53.
- 5. Segalin C. et al. The pictures we like are our image: continuous mapping of favorite pictures into self-assessed and attributed personality traits // IEEE Transactions on Affective Computing. − 2016. − T. 8. − №. 2. − Pp. 268–285.

АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЕКТАХ И ПОИСКА КОМАНДЫ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ

Чернова Е.А.¹ (студент)

Научный руководитель – доцент, к.т.н. Перл $И.A.^1$

1 – Университет ИТМО

e-mail: 337039@niuitmo.ru

Статья представляет собой детальный анализ проблемы поиска команды для совместной работы над проектом. Описаны различные способы поиска партнеров для проектов, проведен сравнительный анализ существующих онлайн-платформ и описан процесс создания собственной платформы на основе выявленных недостатков предыдущих.

Ключевые слова

Веб-приложение, командообразование, совместная работа, поиск команды, интерфейс.

В современном мире вопрос поиска достойной команды для совместной работы над проектом становится актуальным как никогда. Существуют различные механизмы поиска партнеров для выявления необходимых навыков для решения различных видов проблем и создания эффективных совместных команд [1].

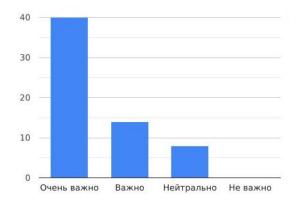
Одним из самых распространенных способов построения эффективной команды проекта является поиск партнеров среди коллег и знакомых. Такой способ подходит далеко не всем ввиду отсутствия большого количества компетентных знакомых в нужной сфере. Еще одним способом является посещение тематических форумов или хакатонов. Такой способ требует гораздо больше времени и усердия, так как форумы и хакатоны не нацелены на создание долгосрочных командных отношений. Есть возможность доверить поиск профессионалам рекрутингового агентства. Однако такой способ требует дополнительных денежных средств и выделение времени на поиск профессионала, который хорошо понимает специфику работы стартапа. Таким образом, можно сделать вывод, что все перечисленные способы не являются идеальными, быстрыми и бюджетными. Проблема поиска команды для проекта актуальна также и в нашем университете, так как есть запрос и со стороны преподавателей, и со стороны студентов. Решение – поиск партнеров при помощи онлайн-платформ (специфичных веб-приложений). Использование онлайн-платформ для поиска партнеров часто экономит время и ресурсы. Вместо того чтобы лично контактировать с большим числом потенциальных партнеров или обращаться к рекругинговым агентствам, пользователи могут быстро и эффективно находить партнеров через онлайн-платформы. Целью моего исследования является анализ существующих платформ для поиска команды на основании требований основной целевой аудитории. Также по результатам анализа будет приниматься решение о создании собственной платформы при наличии существенных недостатков в вебприложениях, представленных к анализу.

Для проведения анализа необходимо определить метрики, согласно которым будет производиться сравнение существующих приложений. В марте 2024 года мною был проведен опрос среди студентов факультета программной инженерии и компьютерной техники Университета ИТМО, было опрошено 62 респондента. На вопрос о готовности оплаты ежемесячного взноса за отдельный функционал платформы 89% отреагировали отрицательно, 11% – утвердительно. Весь функционал данных платформ можно разделить на следующие категории:

1) создание и публикация проекта,

- 2) просмотр галереи существующих проектов/вакансий,
- 3) просмотр деталей проекта/вакансии,
- 4) авторизация.

На рисунке 1 и 2 представлены результаты опроса о важности присутствия особого функционала на платформе.



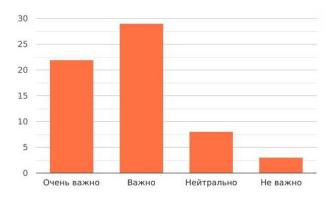


Рис. 1. Функция фильтрации проектов

Рис. 2. Функция сохранения понравившегося проекта

Также одними из самых востребованных функциональных возможностей являются:

- 1) возможность создания нескольких проектов;
- 2) возможность просмотра деталей проектов;
- 3) возможность отправить заявку на участие;
- 4) возможность регистрации без указания компании/команды;
- 5) возможность просмотра профилей участников проекта.

На основании ответов респондентов и эффективных стратегиях поиска партнеров были выделены наиболее важные характеристики, а также составлена сравнительная таблица для оценивания существующих платформ [2].

Сейчас существует пять нужных платформ, две из которых не являются открытыми. Рассмотрим остальные три — «StartupFellows», «OnBench» и «Spark» [3–5]. «StartupFellows» — платформа, которая помогает предпринимателям найти соучредителей для своих стартапов, основная сфера поиска — специалисты в области информационных технологий. Платформа «OnBench» имеет более широкий профиль, и на ней можно найти партнеров для проектов в различных сферах. Платформа «Spark», в свою очередь, ориентирована на студентов и молодых предпринимателей.

Таблица Сравнительная таблица для оценивания существующих платформ

ерабинтельная таблица для оценивания существующих илатформ				
Категория сравнения	Startup Fellows	OnBench	Spark	Максимальный возможный балл
Возможность создания проекта	1	1	1	1
Возможность создания нескольких	1	1	0	1
проектов				
Возможность редактирования	1	1	0	1
проекта				
Возможность удаления проекта	1	1	0	1
Просмотр галереи проектов	1	1	1	1
Применение фильтров к галерее	0	0	1	1
проектов				
Поиск проектов по ключевым	0	1	1	1
словам				
Просмотр деталей проектов	1	2	1	2
Связь с лидером проекта	1	1	0	1

Продолжение таблицы

Категория сравнения	Startup Fellows	OnBench	Spark	Максимальный возможный балл
Просмотр профилей участников проекта	0	0	1	1
Поиск и просмотр профилей зарегистрированных пользователей	1	1	1	1
Возможность отправления заявки на участие	1	1	0	1
Возможность добавления проекты в сохранённые проекты	0	0	1	1
Возможность оценивания проектов	0	0	0	1
Возможность регистрации без указания компании/команды	1	0	0	1
Редактирование профиля	1	1	1	1
Всего	11	12	9	17

По результатам сравнительного анализа можно сделать вывод, что ни одна из существующих платформ полностью не выполняет требования пользователей. У каждой из них есть свои преимущества. Например, «StartupFellows» предоставляет доступ к широкой базе данных пользователей с разным опытом и разными навыками, но основной важный функционал (фильтрация проектов, поиск по ключевым словам) доступен только по платной подписке. На платформе «OnBench» можно просматривать и предоставлять детализированные данные о проекте, разделенные по разным категориям: язык, локация проекта, ссылки на проект, необходимые навыки и размер оплаты. В то же время на остальных платформах у проектов есть только общее описание, в котором можно сразу не найти нужную информацию. Но на платформе «OnBench» регистрация проходит в три этапа, на одном из которых необходимо указывать компанию, в которой работает пользователь. Платформа «Spark» занимает последнюю позицию в рейтинге и скорее нацелена на продвижение существующих проектов, чем на поиск людей для работы. Контакты руководителя проекта могут быть указаны только в общем описании, поэтому не всегда есть возможность подать заявку на участие.

В результате анализа было принято решение о создании собственной полностью бесплатной платформы Crossroads, которая включала бы в себя всю необходимую функциональность и соответствовала всем требованиям. Для ее создания было принято решение использовать монолитную архитектуру, в качестве языка программирования для написания сервера был выбран язык Java, для написания клиентской части был выбран фреймворк JavaScript React, реализация базы данных при помощи свободной объектнореляционной системы управления базами данных PostgreSQL [6–8].



Рис. 3. Интерфейс страницы регистрации



Рис. 4. Интерфейс страницы профиля пользователя



Рис. 5. Интерфейс каталога проектов

Рис. 6. Интерфейс страницы проекта



Рис. 7. Блок деталей проекта

В разработанном приложении есть возможность создания, редактирования, удаления проектов. Пользователь может осуществлять просмотр галереи проектов с применением фильтров и поиска по ключевым словам (рис. 5). Есть возможность просмотра деталей проектов, в том числе просмотр доступных тем, команды проекта, оценки проекта и другую статистику (рис. 6). Возможен поиск и просмотр профилей зарегистрированных пользователей, отправка заявки на участие, добавление проекта в сохранённые проекты, оценивание проектов и регистрация без указания компании/команды. Также возможно редактирование профиля и получение статистики по нему (рис. 7). Функционал приложения выполняет все описанные в таблице требования, при том, что платформа является абсолютно бесплатной.

- 1. Montelisciani G., Gabelloni D., Tazzini G., Fantoni G. Skills and wills: the keys to identify the right team in collaborative innovation platforms // Technology Analysis & Strategic Management. − 2014. − V. 26. − № 6. − Pp. 687–702.
- 2. Gervas N., Romanov E., Hardt W. Classification for Quality Assessment of the User Interface and its Application in the Development of Web-applications // Embedded Selforganising Systems. − 2021. − № 8. − Pp. 16–21.
- 3. StartupFellows обзор сервиса. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://startupfellows.ru (дата обращения 10.03.2024).
- 4. OnBench обзор сервиса. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://onbench.io/en/ (дата обращения 10.03.2024).
- 5. Spark обзор сервиса. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://spark.ru (дата обращения 10.03.2024).
- 6. Документация Spring Framework Cookbook. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.javacodegeeks.com/wp-content/uploads/2017/01/SpringFramework-Cookbook.pdf (дата обращения 10.03.2024).
- 7. Документация PostgresSql. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://postgrespro.ru/docs/postgresql (дата обращения 10.03.2024)
- 8. Документация React JS. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.react.js.org/ (дата обращения 10.03.2024).

ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ИСПОЛНЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЁННЫХ ЗАДАЧ В ОБЛАЧНОМ ОКРУЖЕНИИ

Шагиев С.И.¹ (студент)

Научный руководитель — к.т.н., доцент Перл $\mathit{H.A.}^1$

1 – Университет ИТМО

e-mail: shagiev@niuitmo.ru, ivan.perl@itmo.ru

В статье описаны проблемы автоматического масштабирования контейнеризированных приложений и сохранения прогресса при долгих вычислениях, которые присущи облачной системе исполнения системно-динамических моделей sdCloud. А также приведен сравнительный анализ инструментов и подходов, потенциально применимых для решения вышеуказанных проблем. Инструменты, анализ которых приведен в статье: Kubernetes, Docker Swarm, Elixir, ElasticDocker, Apache Spark, CRIU.

Ключевые слова

Контейнеризация приложений, автоматическое масштабирование, сохранение прогресса вычислений, Kubernetes, Docker Swarm, Elixir, ElasticDocker, Apache Spark, CRIU.

Лаборатория облачных решений и моделирования университета ИТМО занимается разработкой и поддержкой облачной платформы для исполнения системно-динамических моделей sdCloud. Текущая архитектура системы имеет недостатки, из которых выливаются две основные проблемы.

Первая проблема заключается в том, что в нынешней реализации в один момент времени существует только один контейнер с сервисом, ответственным за исполнение моделей. На каждый новый запрос в этом сервисе запускается новый процесс внутри контейнера, в котором происходит симуляция. Когда в систему поступает небольшое количество запросов, то в контейнере одновременно исполняется небольшое количество процессов, и симуляция работает корректно, но когда запросов становится слишком много, то ресурсов контейнера становится недостаточно для того количества процессов, которые создаются сервисом, таким образом приложение в контейнере аварийно завершается.

Вторая проблема заключается в том, что любая ошибка, возникающая в процессе исполнения, приводит к потере прогресса вычислений. Это особенно важная проблема для симуляций, так как некоторые из них могут исполняться часами, сутками или даже месяцами, и в случае потери прогресса такой симуляции затраты на повторные вычисления будут огромными и будут пагубно влиять на качество опыта пользователя (QoE).

Для решения описанных проблем были проведены исследования, сравнивающие современные подходы и инструменты в области управления и автоматического масштабирования контейнеризированных приложений. Ряд инструментов в настоящее время предлагает возможности автоматизации масштабирования контейнеров.

Например, Kubernetes — система для автоматизации развёртывания, масштабирования и управления контейнеризированными приложениями. Имеет встроенный Horizontal Pod Autoscaler, который позволяет автоматически масштабировать модули на основе определенных метрик. Kubernetes предоставляет широкий функционал для управления контейнерами, но требует определенных навыков и времени на настройку и поддержку. Сложность работы с Kubernetes может требовать наличия отдельного специалиста, что может быть неприменимо для некрупных организаций или лабораторий.

Другим примером является ElasticDocker, который представляет собой автоматическую систему вертикального масштабирования Docker контейнеров, способную автоматически

регулировать выделенные ресурсы CPU и RAM для контейнера. В случае недостатка ресурсов на узле система осуществляет миграцию контейнера на другой узел, обеспечивая непрерывную работу приложения. Это позволяет эффективно использовать ресурсы машины, оптимизируя распределение и повышая качество обслуживания (QoS) за счет гибкого выделения ресурсов в зависимости от текущей нагрузки [1].

Еще одним примером является Elixir, который представляет собой автоматическую систему горизонтального масштабирования контейнеров для Docker Swarm, которая обеспечивает балансировку нагрузки между узлами при помощи планировщика. Основное преимущество Elixir заключается в способности масштабировать контейнеры без простоев системы, что позволяет эффективно управлять ресурсами в реальном времени. По сравнению с традиционным Docker Swarm, Elixir демонстрирует существенное увеличение отзывчивости системы, сохраняя оптимальное распределение ресурсов и обеспечивая эффективное функционирование всего контейнерного окружения [2].

В таблице 1 приведен сравнительный анализ упомянутых выше инструментов по основным характеристикам.

Таблица 1 Сравнение инструментов автоматического масштабирования

оравнение инструмен	TIOD abiomain lookoio	Macmiachped	ai 17171
	Kubernetes	ElasticDocker	Elixir + Docker Swarm
Тип масштабирования	горизонтальное и вертикальное	вертикальное	горизонтальное
Сложность настройки	больше	меньше	меньше
Возможность настроить алгоритм	да	да	да
Количество учебных материалов и документации	много	мало	мало

Платформа sdCloud исполняется в кластере из множества машин, так что важно, чтобы инструмент поддерживал горизонтальное масштабирование, так что ElasticDocker не является подходящим решением. Также важно подметить, что так как платформа поддерживается лабораторией, в которой трудятся студенты, важным критерием при сравнении будет являться простота настройки и поддержки. В этом отношении Kubernetes проигрывает конкурентам. Из вышеописанного можно сделать вывод, что самым подходящим решением из рассмотренных является Elixir.

Эффективное решение задачи обеспечения стабильности при возникновении ошибок может быть обнаружено в архитектуре фреймворка Арасhe Spark, предназначенного для эффективной обработки неструктурированных и слабоструктурированных данных в распределенной среде. Он позволяет сохранять состояния вычислений и восстанавливать их, используя концепцию устойчивого распределенного набора данных (RDD) — это неизменяемая и отказоустойчивая распределенная коллекция объектов, которые обрабатываются параллельно. Этот фреймворк предоставляет возможность сохранения состояния работы (прогресса вычислений) в контрольные точки, что дает возможность восстановить выполнение вычислений после сбоев. Однако, для использования Арасhe Spark часто необходимо создавать программу специально под него с нуля или вносить значительные изменения в исходный код существующего приложения. Также важно отметить, что применение Арасhe Spark ограничивается поддержкой определенного набора языков программирования.

Описанные выше проблемы и ограничения можно избежать с применением инструмента CRIU (Checkpoint/Restore In Userspace), утилиты, предназначенной для сохранения состояния процессов Linux. CRIU позволяет создавать контрольные точки, из которых впоследствии можно восстановить процесс. Этот инструмент обеспечивает возможность эффективного сохранения состояния и восстановления процессов, что особенно полезно при работе с контейнеризированными приложениями в области высокопроизводительного вычисления) [3].

CRIU позволяет делать снимки состояния Linux процессов, что позволяет восстанавливать выполнение процессов в будущем. Эти снимки могут быть созданы для любого процесса, независимо от используемого языка программирования или конкретной реализации. Позднее, эти снимки могут быть обрабатываться как обычные файлы, включая возможность их передвижения по сети между узлами в облачном кластере.

В таблице 2 приведено сравнение вышеописанных подходов по сохранению прогресса вычислений.

Таблица 2 Сравнение подходов по сохранению прогресса вычислений

оравление подходов по сохранению прогресса выч	NCHEUNN	
	Apache Spark	CRIU
Использование вторичной памяти	меньше	больше
Ресурсозатратность создания контрольных точек и восстановления из них	меньше	больше
Необходимость вносить изменения в исходный код приложения	да	нет
Зависимость от языка программирования	да	нет
Зависимость от версии ядра операционной системы	нет	да

Среди сравненных подходов наиболее применимым для решения проблемы является подход с использованием утилиты CRIU. Несмотря на то, что он является более ресурсозатратным, отсутствие необходимости вносить значительные изменения в существующий код являются большим преимуществом в решении данной проблемы.

Среди рассмотренных инструментов наиболее удачным решением для решения проблем с автоматическим масштабированием и потерей прогресса длительных вычислений у платформы sdCloud будет внедрение инструментов Elixir и CRIU в архитектуру приложения. При сравнительном анализе эти решения оказались проще во внедрении и поддержке, что особенно важно для проекта, поддерживаемого силами студенческой лаборатории. В дальнейшем предлагается разработать архитектуру, включающую в себя Elixir и CRIU, реализовать платформу по разработанной архитектуре и провести исследования, как вышеупомянутые подходы повлияют на характеристики системы.

- 1. Al-Dhuraibi Y., Paraiso F., Djarallah N., Merle P. Autonomic Vertical Elasticity of Docker Containers with ELASTICDOCKER // 2017 IEEE 10th International Conference on Cloud Computing (CLOUD). 2017. Pp. 472–479.
- 2. Alexiou M.S., Petrakis E.G.M. Elixir: An Agent for Supporting Elasticity in Docker Swarm // AINA 2020: Advanced Information Networking and Applications. 2020. V. 1151. Pp. 1114–1125.
- 3. Vasyukov A., Beklemysheva K. Using CRIU with HPC Containers Field Experience // International Journal of Engineering and Computer Science. 2018. V. 7 Pp. 24106-24108.

ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ

Шиян А.С.¹ (аспирант) Научный руководитель – к.т.н., доцент Баймуратов И.Р.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: an.sshiyan@gmail.com

Заболевания культурных растений являются серьезной угрозой не только для урожая, но и для самих растении. Промедление или неверная диагностика могут привести к гибели культуры, а сам процесс распознавания трудоемок и трудозатратен: требует привлечения экспертов. В данной работе рассмотрено применение алгоритмов глубокого обучения к классификации заболеваний культурных растений с целью автоматизации процесса выявления заболеваний растений.

Ключевые слова

Цифровое сельское хозяйство, болезни растений, классификация болезней растений, глубокое обучение, обработка изображений.

Растениеводство играет одну из ключевых ролей как в мировой и российской экономике, так и в повседневной жизни. Распознавание заболеваний культурных растений, особенно на ранних стадиях развития, является трудоемким процессом, требующим больших трудозатрат и привлечения экспертов. Несвоевременное выявление заболеваний приводит к уменьшению урожая и в тяжелых случаях гибели растений. Автоматизация данного процесса способна не только повысить показатели урожайности, но и уменьшить трудозатраты.

Первым шагом к автоматизации процесса выявления заболеваний является разработка алгоритма классификации растений и их заболеваний. В работе рассмотрено применение моделей глубокого обучения к классификации заболеваний растений. Для этого необходимо провести исследование, в результате которого будут выявлены наиболее точные методы распознавания растений и их заболеваний.

Для тестирования алгоритмов был проведен поиск наборов данных, в результате которого выбраны PlantVillage [1] и PlantDoc [2], содержащие наибольшее количество классов. Набор данных PlantVillage содержат 54309 изображений. Изображения охватывают 14 видов сельскохозяйственных культур и их заболеваний. Все изображения листьев сделаны в экспериментальных исследовательских участках на бумажном листе с серым или черным фоном. Пример изображений набора данных представлен на рисунке 1.

Strawberry__healthy



Tomato___Septoria_leaf_spot



Potato Late blight



Рис. 1. Примеры изображений PlantVillage

Набор данных Cropped-PlantDoc состоит из 9216 RGB изображений здоровых и больных листьев растений, имеющих 28 классов. Класса Tomato two spotted spider mites leaf не применялся для обучения и тестирования, поскольку не содержится в тестовой выборке, а в обучающей имеет только 2 изображения. В отличие от набора данных PlantVillage, в данном наборе изображения сделаны в естественных условиях, что позволяет получить более точные результаты распознавания на реальных данных. Поскольку набор данных Cropped-PlantDoc имеет малое количество изображений, он был увеличен с помощью поворота изображений на 70 градусов. С помощью поворота количество изображений в каждом классе было увеличено до 200. Пример полученных изображений приведен на рисунке 2.



Рис. 2. Примеры изображений PlantDoc

Для реализации алгоритмов была выбрана библиотека Keras [3], содержащая модели глубокого обучения, которые доступны наряду с предварительно обученными весами. Эти модели могут быть использованы для прогнозирования, извлечения признаков и тонкой настройки.

Эксперименты проводились на моделях MobileNetV3Small [4], EfficientNetB0 [5] и DenseNet121 [6], предобученными на наборе данных ImageNet. На вход всех моделей подавались RGB изображения, преобразованные к размеру 224х224. Для всех моделей в качестве функции активации выбрана softmax. Оптимизатор Adam. Для всех моделей, обученных на наборе данных PlantVillage, число батчей и скорость обучения были установлены на 8 и 0.01. Для всех моделей, обученных на наборе данных PlantDoc, число батчей и скорость обучения были установлены на 32 и 0.001.

В результате на основе выбранных моделей было разработано 6 различных алгоритмов для 2 наборов данных, размещенных в Github репозитории [7]. Таблица показывает точность для каждой модели на выбранных наборах данных, время и память затраченные на обучение модели. Для системы распознавания была выбрана модель EfficientNetB0, обученная на наборе данных PlantVillage. На рисунке 3 представлен график точности для этой модели во время обучения на обучающем и проверочном наборах данных.

Таблица

Точность моделей

Модель	Набор данных	Память (Байт)	Время (секунд)	train	valid	test
MobileNetV3Small	PlantVillage	5951700992	76.966	0.924	0.946	0.941
EfficientNetB0	PlantVillage	4641333248	147.93	0.951	0.941	0.953
DenseNet121	PlantVillage	5527531520	208.48	0.712	0.791	0.793
MobileNetV3Small	Cropped-PlantDoc	2138210304	148.20	0.893	0.467	0.428
EfficientNetB0	Cropped-PlantDoc	2384695296	1321.57	0.943	0.607	0.542
DenseNet121	Cropped-PlantDoc	3198476288	3458.17	0.636	0.339	0.263
MobileNetV3Small	Расширенный Cropped-PlantDoc	5653348352	753.42	0.943	0.717	0.432
EfficientNetB0	Расширенный Cropped-PlantDoc	5301334016	3869.99	0.941	0.819	0.563

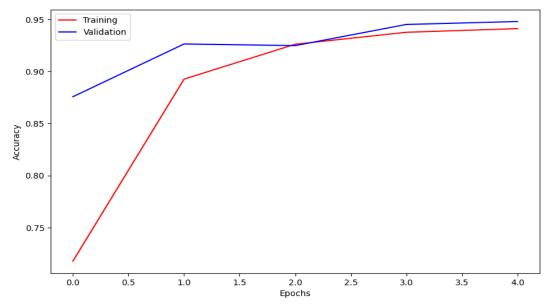


Рис. 3. График точности

Таким образом, были разработаны алгоритмы распознавания заболеваний культурных растений и протестированы на двух различных наборах данных, были сравнены показатели точности, время работы и потребляемая память, на основе которых был выбран лучший алгоритм.

- 1. Hughes D. et al. An open access repository of images on plant health to enable the development of mobile disease diagnostics //arXiv preprint arXiv:1511.08060. 2015.
- 2. Singh D. et al. PlantDoc: A dataset for visual plant disease detection //Proceedings of the 7th ACM IKDD CoDS and 25th COMAD. 2020. Pp. 249–253.
- 3. Keras Applications [Электронный ресурс] // Keras Режим доступа: https://keras.io/api/applications/ (дата обращения: 20.09.2022).
- 4. Howard A. et al. Searching for mobilenetv3 //Proceedings of the IEEE/CVF international conference on computer vision. 2019. Pp. 1314–1324.
- 5. Tan M., Le Q. Efficientnet: Rethinking model scaling for convolutional neural networks //International conference on machine learning. PMLR, 2019. Pp. 6105–6114.
- 6. Huang G. et al. Densely connected convolutional networks //Proceedings of the IEEE conference on computer vision and pattern recognition. 2017. Pp. 4700–4708.
- 7. Shiyan A. (2023) PlantDoc-and-PlantVillage-recognition. [Электронный ресурс] // Github Режим доступа: https://github.com/shiyanna/PlantDoc-and-PlantVillage-recognition/ (дата обращения: 20.12.2023).

НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ВНИМАНИЯ ДЛЯ МУЛЬТИКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИЯ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПО СНИМКАМ МАГНИТНОЙ-РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ

Ян Ц.¹ (студент) Научный руководитель – к.т.н. Русак А.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: tszyafengyang@gmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В данной работе рассмотрены различные механизмы внутреннего внимания нейросетевой архитектуры Vision Transformer (ViT) для анализа и обработки медицинских изображений. Для решения задачи мультиклассовой классификации опухолей головного мозга по снимкам магнитной-резонансной томографии лучший результат показала модель ViT с механизмом внимания Nystromformer. По итогам экспериментов для данной модели достигнуто окончательное значение F1-меры, составившее 92%.

Ключевые слова

Механизм внимания, трансформер для компьютерного зрения, классификация опухолей головного мозга, нейронная сеть, магнитная-резонансная томография.

Диагностика опухолей головного мозга (ОГМ) представляет собой важное направление клинической нейрохирургии. Учитывая быстрое прогрессирование и сложности в лечении ОГМ, их ранняя диагностика имеет критическое значение для успешного лечения. Традиционная классификация ОГМ основана на гистологических особенностях и требует ручного анализа опытными специалистами. Однако из-за разнообразия типов ОГМ, их морфологической сложности и неопределенности расположения, методы ручного анализа сталкиваются с проблемами, такими как большая трудоемкость, высокие затраты и субъективные результаты.

В связи с этим актуальной задачей является разработка модели для автоматизации мультиклассовой классификации ОГМ на основе снимков магнитно-резонансной томографии (MPT). Это позволит эффективно справиться с вызовами, связанными с диагностированием различных типов ОГМ, ускорить процесс и улучшить общую точность диагностики.

Для решения данной задачи могут использоваться традиционные методы машинного обучения. Эти методы в основном включают такие процессы, как предварительная обработка данных, извлечение и отбор признаков, уменьшение размерности данных, обучение и тестирование модели. Извлечение и отбор признаков являются наиболее важными этапами, результат которых в значительной степени зависит от профессиональных знаний специалиста в исследуемой области. Этот полуавтоматический процесс по-прежнему требует определенной степени участия человека.

В последние годы сверточные нейронные сети (CNN) показали хорошие результаты в задачах классификации изображений. Методы, основанные на использовании сверточной нейронной сети, могут автоматически извлекать низкоразмерные и высокоразмерные особенности из снимков МРТ с помощью ядер свертки. Однако, поскольку рецептивное поле операции свертки ограничено размером ядра свертки, сложно получить глобальные признаки изображения с помощью CNN. Появление архитектуры трансформер с механизмом внимания позволяет эффективно решить эту проблему. Новые варианты модели Vision Transformers

(ViT) [1] с разными механизмами внимания демонстрируют многообещающие результаты в задачах классификации изображений. Поэтому данная работа направлена на исследование возможности применения нейросетевых моделей на основе внимания для анализа и обработки медицинских изображений на примере задачи мультиклассовой классификации ОГМ по снимкам МРТ.

Набор данных, используемый в данной работе, представляет собой комбинацию трех наборов данных от figshare, SARTAJ и Br35H [2]. Обучающий набор состоит из 1321 изображения глиомы, 1339 изображений менингиомы, 1595 неопухолевых изображений и 1457 изображений гипофиза. Соотношение распределения изображений для обучения, валидации и тестирования составляет 4:1:1. На рисунке 1 показаны примеры изображений, представляющих различные типы ОГМ. Поскольку размеры изображений разные, на этапе предобработки данных необходимо уменьшить изображения до определенного размера. Затем можно искусственно увеличить количество изображений, используя такие методы аугментации, как вращение и отражение изображения по горизонтали.

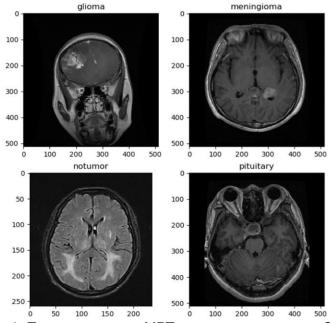


Рис. 1. Пример снимков МРТ с разными классами ОГМ

В данной работе разработаны модели, основанные на архитектуре ViT с разными механизмами внимания. На рисунке 2 показана архитектура модели ViT.

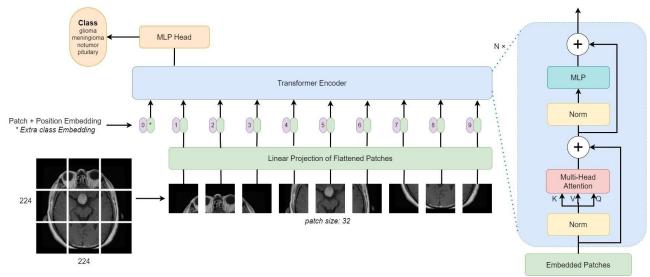


Рис. 2. Схема архитектуры ViT для задачи классификации ОГМ

Суть ViT заключается в том, что предобработанные изображения (размером 224х224) делятся на 7х7 патчей с фиксированным размером 32. Затем каждый из них выстраивается линейно, добавляется эмбеддинг позиции, и полученная последовательность векторов передается в энкодер трансформера. Чтобы выполнить классификацию, в последовательность добавляется дополнительный токен классификации. После ряда вычислений мы наконец получим классификационный вектор.

Механизм внимание можно описать как функцию, сопоставляющую запрос (query) и набор пар ключ-значение (key-value) с выходными данными, где запрос, ключи, значения и выходные данные являются векторами. В стандартном ViT внимание, как показано на рисунке 3, основано на масштабированном скалярном произведении запроса и ключа. Такая реализация дает softmax-нормализованное внимание, имеющее квадратичную сложность. Из-за ограничений памяти графического процессора в данной работе мы сосредоточимся на разреженных механизмах внимания, таких как линейное внимание [3], внимание в Nystromformer [4] и внимание Sinkhorn [5].

Linformer использует линейное приближение внимания с общими параметрами, что снижает сложность до O(n) во времени и в пространстве. Добавление двух матриц линейной проекции, как показано на рисунке 4, при вычислении ключей и значений помогает снизить вычислительную сложность и лучше обрабатывать длинные последовательности входных данных.

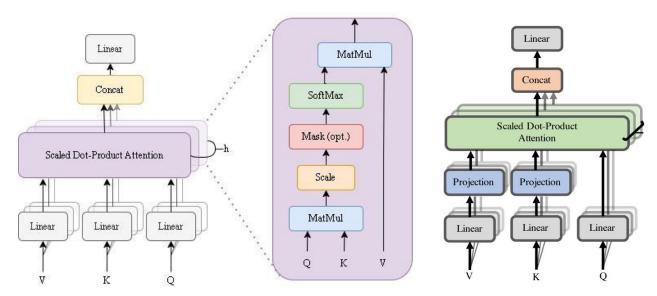


Рис. 3. Схема внимания в стандартном ViT

Рис. 4. Схема внимания в Linformer

Nystromformer использует метод Нистрома для приближения матрицы softmax. Метод Нистрома — это численный метод для приближенных матричных расчетов, который существенно уменьшает вычислительные затраты. Если коротко, внимание в Nystromformer вычисляет три матрицы меньшей размерности (выделены на рисунке 5) и их комбинации, а не всю большую матрицу.

Внимание Sinkhorn включает в себя параметризованную сеть сортировки, которая использует нормализацию Sinkhorn для выборки матрицы перестановок (рис. 6). Эта матрица перестановок помогает сопоставить наиболее релевантные группы ключей с группами запросов. После сортировки последовательности происходит вычисление внимания только в локальном окне, что позволяет избежать необходимости рассчитывать внимание по всей матрице. Такой подход существенно снижает требования к вычислительным ресурсам и объему используемой памяти.

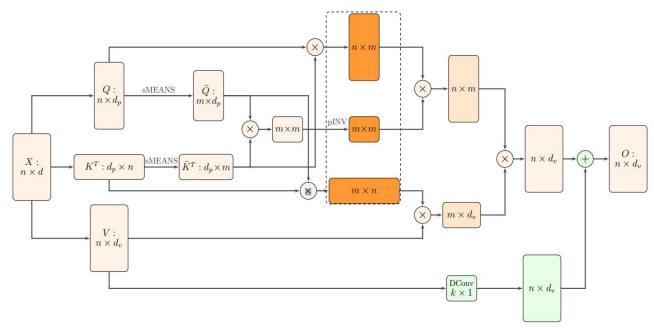


Рис. 5. Схема внимания в Nystromformer

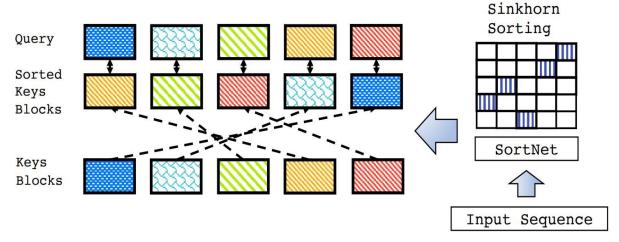


Рис. 6. Схема внимания Sinkhorn

В данной работе модели обучались на графическом процессоре NVIDIA GeForce RTX $3070~8~\Gamma$ Б. Для обучения использовались следующие параметры: размер партий – 32, скоростью обучения – 0.00007 и количество эпох – 100. Оптимизатором для обучения экспериментальной модели в этой работе является Adam, предоставленный PyTorch.

В ходе экспериментальных исследований были протестированы следующие архитектуры моделей: ViT, ViT с вниманием Linformer, ViT с вниманием Nystromformer и ViT с вниманием Sinkhorn. Результаты классификации ОГМ по снимкам МРТ оценены с помощью трех мер оценки: Precision (точность), Recall (полнота) и Macro F1-score.

Отчеты о результатах классификации на этапе тестирования представлены в таблице. Модель ViT, использующая механизм внимания Nystromformer, продемонстрировала наивысшие значения F1-меры (92%) среди всех рассмотренных моделей. Модель ViT с линейным вниманием также показала хорошие результаты, но незначительно уступала по сравнению с моделью, использующей механизм внимания в Nystromformer. Модель ViT с вниманием Sinkhorn продемонстрировала результаты, сопоставимые с моделью простого ViT. Это показывает, что такое внимание не привнесло существенного улучшения в производительность модели для данной задачи.

Таблица

Отчет о результатах классификации на этапе тестирования

Модели	Классы	Точность	Полнота	Macro F1-score
	Глиома	0.86	0.84	0.85
	Менингиома	0.79	0.78	0.79
ViT	Без опухоли	0.93	0.93	0.93
	Гипофиз	0.93	0.96	0.94
	Общая	0.88	0.88	0.88
	Глиома	0.90	0.87	0.89
	Менингиома	0.85	0.82	0.83
Linformer	Без опухоли	0.93	0.95	0.94
	Гипофиз	0.95	0.98	0.96
	Общая	0.91	0.91	0.91
	Глиома	0.91	0.87	0.89
	Менингиома	0.86	0.85	0.85
Nystromformer	Без опухоли	0.94	0.96	0.95
	Гипофиз	0.96	0.98	0.97
	Общая	0.92	0.92	0.92
	Глиома	0.89	0.85	0.87
	Менингиома	0.81	0.81	0.81
Sinkhorn	Без опухоли	0.93	0.93	0.93
	Гипофиз	0.94	0.98	0.95
	Общая	0.89	0.89	0.89

В целом результаты показывают, что внимание Nystromformer среди описанных выше механизмов внимания является наиболее эффективным способом улучшить классификацию ОГМ по снимкам МРТ. Однако, дополнительные исследования и сравнения с другими вариантами ViT могут быть полезны для более глубокого понимания и подтверждения этих выводов.

- 1. Dosovitskiy A., Beyer L., Kolesnikov A., et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale // arXiv preprint arXiv:2010.11929. 2020.
- 2. Brain Tumor MRI Dataset. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.kaggle.com/datasets/masoudnickparvar/brain-tumor-mri-dataset (дата обращения: 03.03.2024).
- 3. Wang S., Li B.Z., Khabsa M., Fang H., Ma H. Linformer: Self-attention with linear complexity // arXiv preprint arXiv:2006.04768. 2020.
- 4. Xiong Y., Zeng Z., Chakraborty R., et al. Nyströmformer: A nyström-based algorithm for approximating self-attention [C] // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. − 2021. − V. 35. − № 16. − Pp. 14138−14148.
- 5. Tay Y., Bahri D., Yang L., et al. Sparse sinkhole attention [C] // International Conference on Machine Learning. PMLR. 2020. Pp. 9438–9447.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Цифровые технологии в индустрии
Цифровые технологии в индустрии

УДК 67.05

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ

Андреев Ю.С.¹, Басова Т.В.¹ (аспирант) Научный руководитель – к.т.н., доцент Андреев Ю.С.¹

1 – Университета ИТМО

e-mail: tvbasova@itmo.ru

В работе рассмотрена разработка способа обеспечения работоспособного состояния технологической системы по параметрам качества изготовления деталей за счет разработки и применения метода операционного контроля режущего инструмента и обрабатываемых заготовок. Данный метод такие достоинства как простота реализации и эффективность применения технического решения.

Ключевые слова

Работоспособное состояние, технологическая система, операционный контроль, станки с числовым программным управлением, автоматизация производства.

Во время механической обработки износ и поломка режущего инструмента (РИ), превышение сил резания, тепловые явления, низкая достоверность данных и прочее, могут быть причинами неработоспособного состояния технологической системы, как по обеспечению параметров производительности, так и по параметрам качества изготовления деталей [1, 2]. Подобные нюансы особенно важны при рассмотрении гибких производственных систем в связи с исключением персонала, выполняющего постоянный контроль выполнения технологической операции. При выполнении аналитического обзора отечественных и зарубежных исследовательских работ в области обеспечения работоспособного состояния технологической системы можно сделать вывод, что автоматизация производства путем внедрения систем технического диагностирования и контроля (СТДиК) (РИ) и заготовок, устанавливаемых в рабочую зону технологического оборудования, способствует поддержанию состояния технологической системы. работоспособного Однако ДЛЯ работоспособного состояния технологической системы необходимо решения ряда вопросов, связанных как с автоматизацией программирования систем технического диагностирования и контроля, так и обеспечения автономной работы технологической системы в случае выполнения операционного контроля СТДиК [3].

В научной литературе различают две разновидности СТДиК – контактные и бесконтактные, внешний вид которых представлен на рисунке 1 [4].





Рис. 1. Датчики для технического диагностирования и контроля РИ и заготовок

Существующие системы технического диагностирования и контроля имеют ряд недостатков:

- для работы СТДиК необходима команда, разработанная в зависимости от особенностей РИ/заготовки и выполняемой задачи контроля (цикл измерения);
- требуется сбор данных для программирования СТДиК;
- возможны сбои СТДиК, вызванные: стружкой, вибрацией, охлаждающей жидкостью в зоне измерения, механическими повреждениями и пр.;
- исходные алгоритмы СТДиК не обеспечивают автономную работу технологической системы;
- применение только одного типа датчика не позволяет получать объективные и достоверные данные о технологической системе.

Поэтому, в связи с вышеупомянутыми особенностями, для достижения работоспособного состояния технологической системы был разработан метод операционного контроля РИ и обрабатываемых заготовок. Данный метод осуществляется посредством мультисенсорного объединения данных от СТДиК РИ и заготовки, посредством определения геометрических параметров наблюдаемых объектов в начале и в конце технологических переходов усовершенствованными алгоритмами СТДиК с применением базы данных параметров РИ, а также информации из САМ-проекта обработки, с последующей обработкой результатов измерений [5]. Предлагаемый метод операционного контроля отличается от существующих применением усовершенствованных алгоритмов формирования кода управляющих программ, алгоритмов определения геометрических параметров РИ и заготовки, а также обработки результатов их измерений.

Разработанный метод, представленный в виде блок-схемы на рисунке 2, базируется на результатах контроля РИ и заготовок путем определения геометрических параметров в начале и в конце технологических переходов СТДиК, работающих по циклам измерения, размещенных в коде управляющей программы для оборудования с числовым программным управлением (ЧПУ).



Рис. 2. Блок-схема алгоритма операционного контроля РИ и обрабатываемой заготовки

Геометрические параметры обрабатываемого элемента заготовки и РИ фиксируются системой ЧПУ с целью автоматического расчета величины коррекции на радиус РИ на последнем чистовом технологическом переходе. Подобный подход позволяет адаптировать

технологическую систему к изменяющимся условиям обработки, за счет выявления погрешности обработки и ее последующей компенсации. Данная блок-схема подразумевает исполнение ряда последовательных алгоритмов.

Также при функционировании оборудования с ЧПУ по методу операционного контроля, автоматически системой ЧПУ формируется отчет пользователя. Часть данных в отчете фиксируется в результате функционирования оборудования с ЧПУ по алгоритмам обработки результатов измерений геометрических параметров заготовки, другая часть в —результате обработки результатов измерений геометрических параметров РИ.

С целью автоматизации программирования СТДиК был разработан алгоритм формирования кода управляющих программ, содержащих циклы измерения РИ. Данный алгоритм реализуется с помощью постпроцессора, базы данных параметров режущих и вспомогательных инструментов, а также САМ-системы. Разработанный постпроцессор, формирует циклы измерения РИ в коде управляющей программы на основании информации в САМ-проекте обработки, а также значений параметров РИ в разработанной базе данных параметров режущих и вспомогательных инструментов, заполненной в соответствии с международным стандартом ISO 13399.

Заключительной задачей исследования являлась разработка методики прогнозирования технического состояния РИ, для разработки которой требуется разработка базы данных параметров режущих и вспомогательных инструментов для формирования кода управляющей программы для оборудования с ЧПУ и выбора РИ, а также выполнение операционного контроля РИ и обрабатываемых заготовок в соответствии с разработанным методом [6]. Разработка прогнозной модели износа РИ осуществляется на основании данных, собранных во время функционирования оборудования с ЧПУ по предложенному методу операционного контроля.

Экспериментальная апробация разработанного метода выполнялась на участке станков с ЧПУ, находящегося в составе гибкой производственной системы, которая специализируется на изготовлении деталей повышенной точности. Операционный контроль выполнялся на участке ранее упомянутой гибкой производственной системы во время получистовых и чистовых технологических переходов изготовления отверстий \emptyset 50H7^{+0,025}, \emptyset 40H8^{+0,039}, а также отверстия \emptyset 43,43^{+0,3} под резьбу M45x1,5-7H на партии заготовок из 50 штук.

На основании собранных данных вычисленной коррекции на радиус РИ и его наработки, были разработаны прогнозные модели износа РИ при постоянных условиях обработки, которая представляет собой кусочно-заданные функции, содержащие по три участка: (1) — приработочный износ; (2) — нормальный износ; (3) — катастрофический износ. Одна из кривых износа РИ представлена на рисунке 3. Полученные модели могут быть использованы для определения технического состояния РИ.

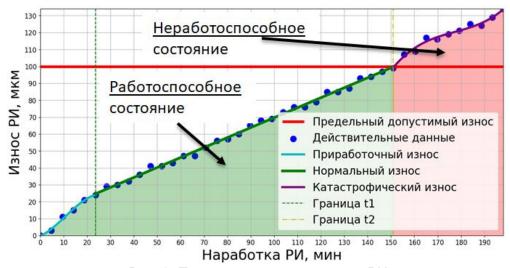


Рис. 3. Прогнозная модель износа РИ

В результате выполненного исследования были решены все поставленные задачи. Следует особо отметить, что:

- внедрение методики прогнозирования технического состояния РИ позволило сократить на 80% производственный брак изготовления деталей с точностью до седьмого квалитета, а также уменьшить производственные простои не менее чем на 60%;
- применение предложенных баз данных РИ позволило сократить время технологической подготовки производства, затрачиваемое на выбор РИ и вспомогательного инструмента от 75%, а также не менее, чем 10% время разработки управляющих программ для оборудования с ЧПУ, при обеспечении их качества;
- применение прогнозной модели износа РИ позволяет обеспечить работоспособное состояние технологической системы по параметрам качества изготовления деталей в течение заданного времени.

Список использованных источников

- 1. ГОСТ 27.004-85 Межгосударственный стандарт. Надежность в технике. Системы технологические. Термины и определения.
- 2. Правиков Ю.М., Муслина Г.Р. Основы теории надежности технологических процессов в машиностроении: учебное пособие // Ульяновск: УлГТУ. 2015. 122 с.
- 3. Темпель Ю.А., Темпель О.А. Особенности и факторы, оказывающие влияние на точность механической обработки на станках с ЧПУ // Новые технологии-нефтегазовому региону. 2016. С. 265–270.
- 4. Вилкина М.В. Современный подход к обработке металла: программирование и инструмент // Ритм машиностроения. 2017. №. 8. С. 16–22.
- 5. Basova T.V., Andreev Y.S., Basova M.V. The Development of Cutting Tools Active Control Methodology for Numerical Control Milling Machines // 2022 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). 2022. Pp. 108–112.
- 6. Андреев Ю.С., Басова Т.В. Разработка метода технического диагностирования режущего инструмента на этапах технологической подготовки производства // Приборы. 2024. №. 1(283). С. 17–25.

УДК 004.03

ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ В РАМКАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ

Ремизов Б.К.¹ (аспирант) **Научный руководитель** – к.т.н., доцент Третьяков С.Д.¹

1 – Университета ИТМО

e-mail: boris.remizow@gmail.com

В работе рассмотрен вопрос работы операционных и информационных технологий в рамках цифровизации промышленного предприятия, определена роль систем промышленного интернета вещей в рамках осуществления интеграции двух уровней предприятия, а также рассмотрены способы улучшения связи данных уровней с помощью технологий, улучшающих систему промышленного интернета вещей, таких как контейнеризация, оркестрация контейнеров и технологии децентрализованный вычислений.

Ключевые слова

Промышленный интернет вещей, операционные технологии, информационные технологии, контейнеризация, технологии децентрализованный вычислений.

Современное производство нацелено на достижение большей экономичности, экологичности и точности своей работы с помощью проведения автоматизации своих технологический процессов. Нынешний этап автоматизации называемый цифровизацией создал большой пласт технологий, работающих уже не непосредственно с производственными объектами, а с той информацией что на нем генерируется. В рамках автоматизации предприятия существует необходимость осуществления взаимодействия новых технологий, связанных с информацией с существующими системами, обеспечивающими работу производства непосредственно на уровне промышленных объектов.

Пласт технологий, работающих с информацией, генерируемой в результате цифровизации и отвечающих за информационное обеспечение производства и называется уровнем информационных технологий (ИТ) предприятия. Данный уровень осуществляет мониторинг, управление и защиту основных функций производства в рамках электронных систем управления предприятием таких как общий облачный сервер, система планирования ресурсов предприятия (ERP — enterprise resource planning), базы данных и другое программное обеспечение для взаимодействия производства с внешним информационным пространством.

К функциям данного уровня относят:

- структурирование, хранение и анализ информации;
- управление информационными потоками предприятия;
- защита информации;
- оптимизация работы предприятия [1].

Работа предприятия не может осуществляться исключительно на основе данных информационных систем. Уровень, более приближенный к непосредственно физическим объектам получил название уровня операционных технологий предприятия (ОТ). На данном непосредственное управление физическими осуществляется устройствами уровне автоматизированного промышленного предприятия. В данную систему включают все элементы, непосредственно функционирующие на физическом уровне предприятия: от транспортных производственного оборудования, сенсоров, средств до программируемых логических контроллеров (ПЛК), промышленных роботов и станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Основное внимание в работе уровня уделяется объему производства и безопасности работников. В связи с потребностью в обеспечении высокой производительности, ключевым вопросом в работе уровня являются поддержание бесперебойной работы производства и техническое обслуживание оборудования.

К функциям операционного уровня относят:

- обеспечение бесперебойного подключения оборудования к системе предприятия;
- мониторинг работ оборудования;
- управления промышленными объектами предприятия;
- обеспечение безопасной работы промышленных объектов [2].

Цифровизация предприятия подразумевает под собой необходимость достижения адаптивности и гибкости работы производства. Такие качества могут быть достигнуты путем обеспечения полной информации о работе производства и достижения лучшей кооперации между непосредственно информационными и операционными системами предприятия. Данное явление получило название конвергенции информационных и операционных технологий [3].

Конвергенция информационных и операционных на данный момент реализуется путем создания системы из таких подходов цифровизации как использование распределенной сети датчиков и исполнительных механизмов, облачных вычислений и аналитики больших данных, которые в совокупности являются ключевыми концепциями технологии промышленного интернета вещей. Таким образом, можно утверждать, что технология промышленного интернета вещей представляет собой решение вопроса конвергенции информационных и операционных технологий, являясь промежуточным уровнем между двумя уровнями, работая как с информационными, так и с операционными технологиями.

Однако системы интернета вещей имеют ряд проблем таких как проблемы безопасности системы, обусловленные необходимостью постоянного обмена информацией между множеством устройств, подключенных в единую сеть, сложность интеграции в работу производства, обусловленная использованием большого количества новых технологий для интеграции системы промышленного интернета вещей, проблемы совместимости различных устройств интернета вещей и задержки при передаче данных, что мешает обеспечению лучшей конвергенции информационных и операционных технологий.

Для решения данных проблем и обеспечения лучшей связи информационных и операционных уровней предприятия на данный момент предлагаются различные решения, расширяющие функционал системы промышленного интернета вещей, так и улучшающих работу уже существующих компонентов. К первой группе можно отнести группу технологий, осуществляющих децентрализованную обработку данных, ко второй технологии типа контейнеризации данных и оркестрами контейнеров данных.

Устройства Интернета вещей содержат ограниченные вычислительные ресурсы, что делает обновление программного обеспечения вручную сложным процессом. Решение данной проблемы возможно при помощи технологии контейнеризации, т. е. записи программного кода в единый исполняемый файл вместе с библиотеками и зависимостями (контейнер). Контейнеризация позволяет разработчикам легко развертывать и обновлять приложения на устройствах Интернета вещей. Одним из наиболее часто применяемых решений в области контейнеризации является программное обеспечение с открытым исходным кодом Docker [4].

Для работы с контейнерами интернета вещей без необходимости настройки на каждом отдельном устройстве и создания единой системы используют программы оркестрации контейнеров. К таким программам относят, например Kubernetes. Помимо создания единой системы работы с контейнерами такие приложения позволяют обеспечить лучшую масштабируемость системы и упростить процесс оптимизации работы системы путем абстрагирования от уровня физических устройств [5].

Важным способом обеспечить лучшую конвергенцию информационных и операционных технологий является процесс децентрализации вычислений, то есть переноса части вычислительной нагрузки с облачного сервера на локальные устройства и серверы. К таким вычислениям относят туманные вычисления, граничные вычисления и вычисления в

клаудлетах (локальные вычислительные серверы). В рамках данного набора технологий обработка данных переносится либо на существующие на локальном уровне устройства, либо на устройства, специально созданные для этого. Перенос части вычислений позволяет обеспечить более быстрое принятие решение на операционном уровне без создания дополнительной нагрузки на информационный уровень, но в то же время обеспечивает передачу важной для информационного уровня информации с меньшей задержкой за счет уменьшения общего потока данных в облако [6].

Указанные методы улучшения конвергенции информационных и операционных технологий являются непротиворечащими друг другу и могут работать совместно, реализуя каждый свою функцию для достижения лучшего сообщения между уровнями предприятия. На данный момент существует ряд решений, предлагающих объединенную систему из описанных технологий.

Так, разработанная Eclipse платформа ioFog интегрирует такие подходы как граничные вычисления, контейнеризация и оркестрация контейнеров. В рамках создания единой системы граничные устройства технологии граничных вычислений разворачиваются рамках контейнеров Docker, контролируются с помощью локального вычислительного центра, характерного для технологий туманных вычислений, развернутого также в виде контейнера. Общее управление контейнерами осуществляется с помощью программы оркестрации Kubernetes [7].

Данные подходы интеграции информационных и операционных технологий, как и в целом интернет вещей предлагаются как возможные решения для следующих операций промышленного предприятия:

- мониторинг состояния: за счет работы с данными в условиях реального времени обеспечивается постоянный мониторинг за состоянием системы, который может осуществляться как автономно, так и при участии человека;
- профилактическое обслуживание: следствием мониторинга за состоянием является возможность получать данные о сбоях в оборудовании путем предиктивного анализа поступающих данных, который может осуществляться в системе;
- адаптация производственного процесса в реальном времени с использованием данных из нескольких источников: вычисления ближе к грани системы интернета вещей могут позволить в рамках единой системы обеспечить лучшую адаптацию под изменяющемся условия предприятия [8].

Вопрос улучшения конвергенции ИТ и ОТ в рамках системы промышленного интернета вещей, предполагается, должен быть рассмотрен для различных условий работы промышленного производства и должна быть произведена оценка перечисленных методов улучшения конвергенции ИТ и ОТ для достижения лучшей конвергенции и обеспечения лучшей передачи, обработки и анализа данных между операционным и информационным уровнем предприятия.

Список использованных источников

- 1. Schäfer G., Waclawek H., Riedmann S., Binder C. Neureiter, Christian & Huber, Stefan. (2023). IT/OT Integration by Design. 10.48550/arXiv.2305.19735.
- 2. How Do OT and IT Differ? [Электронный ресурс]. https://cisco.com/c/en/us/solutions/internet-of-things/what-is-ot-vs-it.html. (дата обращения: 09.02.2024).
- 3. IT-OT convergence. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://techtarget.com/searchitoperations/definition/IT-OT-convergence. (дата обращения: 09.02.2024).
- 4. Docker. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://docker.com (дата обращения: 09.02.2024).
- 5. Kubernetes, [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kubernetes.io (дата обращения: 09.02.2024).

- 6. Dolui Koustabh, Datta Soumya Kanti. Comparison of edge computing implementations: Fog computing, cloudlet and mobile edge computing // IEEE Access. 2017. Pp. 1–6. 10.1109/GIOTS.2017.8016213.
- 7. ioFog [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://iofog.org (дата обращения: 09.02.2024).
- 8. Sulieman N.A., Ricciardi Celsi L., Li W., Zomaya A., Villari M. Edge-Oriented Computing: A Survey on Research and Use Cases // Energies. − 2022. − №. 15. − 452 p.

UDC 681.5.073

EXPERIMENTAL PLATFORM FOR LASER BEAM SPOT ASSESSMENT THROUGH COMPUTER VISION METHOD

Muhamad Albani Rizki¹ (PhD Student)
Scientific Supervisor – PhD, assistant professor Yuri V.F.¹

1 – ITMO University

e-mail: muhamadalbanirizki@gmail.com

This article explores the vital role of laser systems in material surface processing, emphasizing their precision and versatility in modifying material properties. Challenges in laser parameter optimization are addressed through the development of an adaptable laser system. A novel experimental platform is introduced to simulate distorted spot shapes on workpiece surfaces, enabling detailed investigations into laser beam characteristics. The platform utilizes sophisticated mechanisms, including stepper motors and a laser attenuator. An IP-camera facilitates continuous video capture for analysis, with ongoing research exploring methods to enhance image performance. Overall, it contributes to advancing understanding and capabilities in laser processing for diverse industrial applications.

Keywords

Laser systems, Material surface processing, Experimental platform, Image processing, Spot shape tracking.

Utilization of laser on material surface processing

Laser systems, renowned for their exceptional precision and coherence, are indispensable tools across various industries owing to their distinctive attributes, including wavelength, intensity, and focusability. The profound correlation between laser properties and material surface processing underscores the technique's prowess in surface modification and microstructure control [1]. Laser processing, leveraging its precise focus and controlled intensity, stands as a rapid and efficient method for altering material surface properties, crucial in application demanding enhanced hardness, improved adhesion, or customized functionalities.

In the realm of material surface processing, lasers assume a pivotal role in facilitating modifications with unparalleled precision, essential for diverse applications from industrial manufacturing to intricate electronic device fabrication. The versatile of laser processing is particularly invaluable. Furthermore, the adaptability of lasers enables the processing of materials with intricate nanostructures, such as nanoparticles, nanosheets, and nanodots, fostering innovation in nanotechnology and advanced materials science [2]. An array of laser-based techniques empowers material surface processing, encompassing practices like annealing, ablation, marking, texturing, etching, patterning, and polishing. These versatile methods utilize laser technology to intricately modify and enhance material surfaces, catering to a wide range of applications across industries.

Continual advancements in laser-based material surface processing aim to enhance precision and quality outcomes. Optimizing intrinsic parameters of laser systems is key to improving accuracy. Critical factors influencing the accuracy of material surface processing include laser power, scan speed, focal length, spot size, substrate temperature, and material type [3].

However, challenges arise when dealing with non-optimal and unstable laser parameters, primarily influence by the uneven surfaces of material undergoing processing. Variations in material surfaces can induce fluctuations in crucial parameters like focal length and spot size, thus destabilizing laser power [4]. This instability is particularly significant in high-precision processing, such as at the micro and nano scales. Consequently, this research addresses these challenges by developing a method that introduces adaptability into laser systems, enabling dynamic responses to the unique surface characteristics of materials undergoing processing.

Design and implementation of experimental platform for laser beam spot assessment

Previous chapter has provided insight into how the shape of a laser beam spot changes upon projection onto a workpiece. However, further exploration is necessary to understand how this shape evolves under conditions such as when the workpiece is angled, offset, or exhibits uneven surface. In the pursuit of advancing laser beam manipulation techniques, a novel experimental platform meticulously engineered as the cornerstone of this research endeavor. This platform serves a sophisticated apparatus dedicated to scrutinizing and altering the shape and dimensions of laser beam spots. Its development represents a significant milestone, as it empowers researchers to conduct detailed investigations into intricate characteristics of laser beam and their interactions with various surfaces.

The construction of this platform involved a meticulous design process, integrating state-of-theart technologies and precision engineering to ensure optimal performance and versatility. From conceptualization to realization, every aspect of the platform's architecture was carefully crafted to facilitate seamless experimentation and data collection. For an exhaustive understanding of the platform's design and functionalities, please refer to figure 1 depicted below.

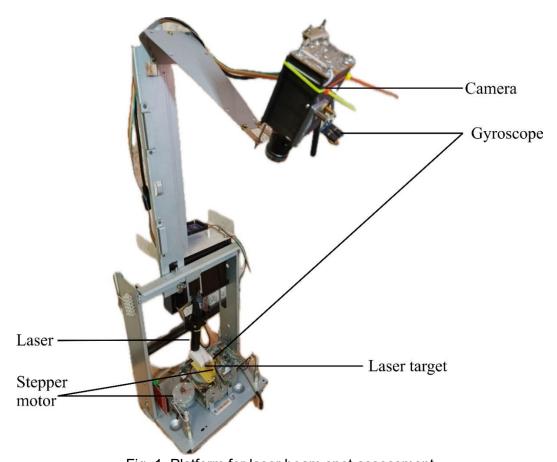


Fig. 1. Platform for laser beam spot assessment

This innovative setup not only allows for the replication of real-world conditions where the spot's shape undergoes distortion but also ensures precise control and measurement of these distortions. By enabling researchers to investigate the impact of various factor such workpiece angle, offset, and surface irregularities on the spot's shape, this mechanism promises to advance our understanding of laser processing techniques and their applications in diverse industrial contexts.

To simulate scenarios where the spot's shape is distorted on the workpiece surface, a sophisticated mechanism has been devised. This mechanism features a moveable platform propelled by two stepper motors, ensuring precise control over its motion. Elevating the platform's rotational precision is achieved through the integration of pulleys with differing diameters, guaranteeing accuracy within a fraction of a degree. Furthermore, the integration of a second stepper motor, renowned for its minimal error rate, ensures comparable precision in positioning, especially when the platform is subjected to tilting as depicted in figure 2 below.

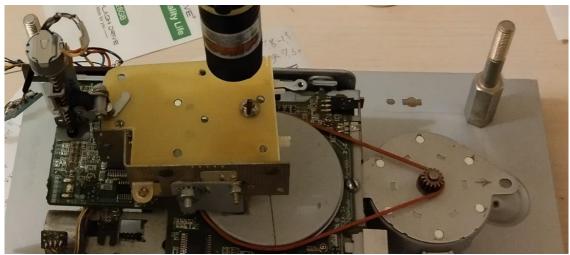


Fig. 2. Moveable platform propelled by two stepper motors

To vividly simulate the alteration in the spot's shape, the projected spot onto the target's surface, situated on the moving platform, is deliberately enlarged, measuring 15 mm in diameter. Referencing figure 3 provides an in-depth illustration of this setup. To ensure accurate projection onto the target surface, and additional optical component – an intricately designed laser attenuator – was developed. This attenuator incorporates a lens, spacer, housing, and nut, ensuring precise beam manipulation.

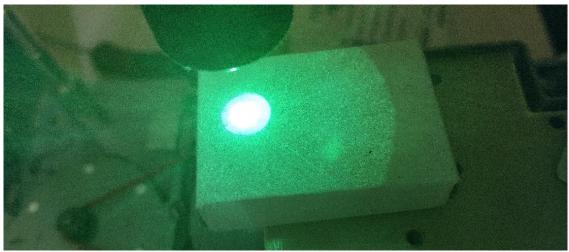


Fig. 3. Laser beam spot

Within the experimental setup, an IP-camera model BLK18E-0012, compliant with the ONVIF protocol, serves as an integral part. It continuously captures video images for processing by dedicated software. Due to constraints in the camera's positioning relative to the spot's projection, it is deliberately placed at an angle to the target. The camera possesses the flexibility to adjust both its angle and linear movement along the target plane's original position, facilitated by a gyroscope for angle tracking.

To monitor platform tilt angles accurately, an accelerometer is integrated into the platform, enabling tilt angles tracking with precision up to 0.1 degrees. However, the effective capturing distance of satisfactory image performance is determined to be 530 mm, introducing complexities into the system's design. Ongoing research explores the feasibility of adjusting the camera's focal length automatically to mitigate this challenge.

It is noteworthy that a single camera tracks the image, interpreting it as necessitating either rotation in one direction or along the same axis but in an alternative direction. Although optical systems exhibit minor errors attribute to imperfections in lens fabrication and optical system alignment, these imperfections insignificantly affect processing quality, given their negligible impact on transmitted radiation power.

The potential for tracking the spot shape during laser processing presents an avenue for correcting spot positioning errors and compensating for inaccuracies. While the utilization of a single camera for spot shape tracking is a viable solution, offering simplicity and efficiency in implementation. However, incorporating a second camera introduces potential benefits that warrant exploration. By employing two cameras, it becomes feasible to capture multiple perspectives of the spot, facilitating more comprehensive monitoring and analysis. This dual-camera setup may offer enhanced accuracy and reliability in spot shape tracking, particularly in complex processing scenarios or when dealing with intricate workpiece geometries.

In conclusion, while the use of a single camera for spot tracking offers a straightforward solution, exploring the incorporation of a second camera presents opportunities for enhanced accuracy and versatility. Further investigation into the utilization of dual-camera setups in laser processing holds promise for advancing precision and efficiency in spot positioning and error compensation.

References

- 1. Aslan N. et al. Production technique–structure relationship in bioceramic-coated scaffold applications // Advanced Ceramic Coatings for Biomedical Applications. Elsevier. 2023. Pp. 165–196.
- 2. Scarisoreanu N.D. et al. Laser processing of nanostructures: enhancing functional properties of lead-free perovskite nanostructures through chemical pressure and epitaxial strain // Functional Nanostructured Interfaces for Environmental and Biomedical Applications. Elsevier. 2019. Pp. 113–152.
- 3. Engineering Steels and High Entropy-Alloys // Engineering Steels and High Entropy-Alloys. 2019. №. 4. Pp. 515–534.
- 4. Rizki M.A., Fedosov Yu.V. Development of adaptive laser head for compensating error of beam waist position during processing materials using laser beam spot detection method // Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics. − 2023. − Vol. 23. − №. 5. − Pp. 859–870.

УДК 620.1.08

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ НЕМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ

Сясько М.В. (аспирант), Соломенчук П.В. Научный руководитель — к.ф-м.н., доцент Соловьев И.П. 1

1 – Санкт-Петербургский государственный университет

2 – OOO «KOHCTAHTA»

e-mail: m.syasko@gmail.com

В работе рассматриваются вопросы конечно-элементного моделирования вихретокового преобразователя, предназначенного для измерения толщины диэлектрического покрытия на электропроводящем немагнитном основании. Описана процедура валидации конечно-элементной модели, включающая в себя получение сигналов изготовленного вихретокового преобразователя с помощью установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия с последующей нормализацией по описанному алгоритму.

Ключевые слова

Вихретоковый, толщиномер, конечно-элементная модель, точность, нормализация сигналов.

Для измерения толщины диэлектрических (например, лакокрасочных) покрытий на металлических немагнитных основаниях применяются вихретоковые толщиномеры покрытий, реализующие амплитудный метод измерений [1], которые во многом не удовлетворяет современным требованиям к погрешности измерений.

В частности, существенное влияние оказывает отличие удельной электрической проводимости основания объекта контроля от удельной электрической проводимости основания, на котором производилась калибровка толщиномера. Эта проблема актуальна в тех случаях, когда нет возможности провести калибровку толщиномера перед проведением измерений на непокрытом участке объекта контроля, например:

- при измерении толщины покрытия на полностью окрашенном изделии, на котором нет возможности снять покрытие с какого-нибудь участка поверхности для проведения калибровки;
- в случае, если значение удельной электрической проводимости основания имеет существенную девиацию по поверхности основания изделия;
- когда изделие имеет разную температуру по поверхности, в этом случае также будет наблюдаться девиация удельной электрической проводимости основания.

Для решения этой задачи представляет интерес использование вихретокового преобразователя и методики обработки его сигналов, основанной на анализе действительной и мнимой составляющих сигнала ВТП на комплексной плоскости с применением алгоритма двухмерной градуировки [2].

Структурная схема трехобмоточного трансформаторного скомпенсированного вихретокового преобразователя представлена на рисунке 1, а. Он содержит:

- обмотку возбуждения W_6 ;
- встречно включенные измерительную Wu и компенсационную $W\kappa$ обмотки, для которых выходная ЭДС равна 0 при $h=\infty$;
- микроконтроллер, который содержит:

- ЦАП и усилитель возбуждения УВ, формирующие напряжение возбуждения;
- усилитель ЭДС обмоток ВТП и АЦП;
- вспомогательные цифровые модули.

На рисунке 1, б приведена трехмерная геометрическая модель ВТП.

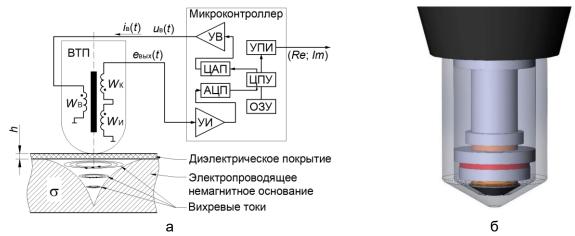


Рис. 1. Трехобмоточный трансформаторный скомпенсированный вихретоковый преобразователь: а) – структурная схема, б) – трехмерная геометрическая модель

Выходным сигналом ВТП является действительная и мнимая составляющие сигнала ВТП в цифровом виде, передаваемые по последовательному цифровому интерфейсу.

Традиционно, при расчете параметров ВТП, применяется конечно-элементное моделирование. В процессе отладки алгоритмов обработки сигналов ВТП, в частности для оценки погрешности метода измерения толщины покрытия, необходимо применение высокоточных КЭ моделей, погрешности расчета сигналов которых должны быть на порядок меньше, чем ожидаемая погрешность метода, обусловленная анализируемым алгоритмом. Для создания КЭ моделей такого уровня с применением существующих коммерчески доступных программ КЭ моделирования необходим учет большого числа факторов, анализу которых посвящена эта работа.

Как правило, процедура построения КЭ модели включает в себя этапы, приведенные на рисунке 2 [3].



Рис. 2. Процедура построение конечно-элементной модели

Программа КЭ моделирования производит построение сетки конечных элементов, при этом производится настройка параметров решателя. Получается конечно-элементная модель, которая может быть применена в повседневных задачах расчета и оптимизации ВТП. Для создания высокоточной КЭ модели обычная процедура построения КЭ модели дополняется операциями, приведенными на рисунке 3.

Полученная «Оптимальная КЭ модель» может быть использована для решения поставлены задач.



Рис. 3. Дополнение процедуры построения высокоточной конечно-элементной модели

Не рассматривая вопросы производительности ЭВМ, следует выделить три основных критерия точности расчетов КЭ модели:

- 1) погрешность расчета сигналов КЭ модели ВТП:
 - а) основную погрешность измерения толщины покрытия;
 - b) дополнительную погрешность, обусловленную отклонением влияющих параметров, в частности удельной электрической проводимости основания объекта контроля;
- 2) погрешность расчета параметров КЭ модели ВТП:
 - а) активное сопротивление и индуктивность обмоток ВТП;
 - b) сила тока возбуждения;
 - с) амплитуда сигнала КЭ модели ВТП при установке ВТП на основание ОК и в воздухе;
 - d) прочие интересующие технологические параметры;
- 3) прецизионность расчета сигналов КЭ модели ВТП.
 - В межгосударственных рекомендациях [4] приведены следующие определения:
- 1. Погрешность результатов измерения это разность между измеренным значением величины и опорным значением величины (опорное значение величины это значение величины, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величин того же рода).
- 2. Прецизионность измерений это близость между показаниями или измеренными значениями величины, полученными при повторных измерениях для одного и того же или аналогичных объектов при заданных условиях.
- 3. При конечно-элементном моделировании принятые термины следует сформулировать следующим образом:
- 4. Погрешность расчета сигналов КЭ модели ВТП это разность между рассчитанным значением толщины покрытия, полученным с помощью КЭ модели ВТП и опорным значением, в качестве которого используются результаты измерения толщины покрытия таким же реальным ВТП в тех же условиях. В данной работе она оценивается при верификации модели с применением реального ВТП, мер и установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия.

Ввиду того, что термин «прецизионность измерений» при конечно-элементном моделировании теряет смысл, его следует выразить, используя термин: Вариация расчета показаний КЭ модели ВТП толщиномера — это разность показаний КЭ модели ВТП толщиномера в одной и той же точке диапазона измерений при плавном подходе к этой точке со стороны меньших и больших значений измеряемой величины. Определение вариации расчета показаний КЭ модели ВТП толщиномера и алгоритма вычисления толщины покрытия производится в процессе моделирования по методике, описанной далее.

На рисунке 4, а приведено графическое представление двухмерной осесимметричной КЭ модели ВТП.

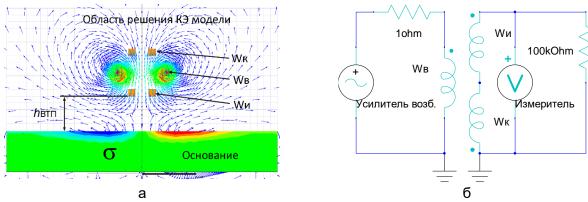


Рис. 4. Конечно-элементная модель: a) – графическое представление, б) – электрическая схема

KЭ модель состоит из обмоток $BT\Pi$: возбуждения W_6 , измерительной W_u и компенсационной W_K , основания объекта контроля, области решения KЭ модели.

Цветовым полем в основании объекта контроля показано распределение плотности вихревых токов. Цветными стрелками обозначены векторы индукции результирующего магнитного поля, являющегося суперпозицией магнитного поля обмотки возбуждения и вихревых токов.

В качестве материала обмоток ВТП используется медь без учета влияния вихревых токов в плоскости КЭ модели. Материал с такими параметрами качественно отражает электромагнитные свойства многовитковой катушки, намотанной медным проводом с лаковой изоляцией.

Материал основания объекта контроля немагнитный, значение удельной электрической проводимости задано переменной.

Ввиду того, что в KЭ модели рассматривается задача измерения толщины диэлектрического покрытия, с которым магнитное поле не взаимодействует, покрытие задается зазором между ВТП и основанием объекта контроля. Это расстояние, $h_{\rm BT\Pi}$, является суммой толщины покрытия h и технологического зазора ВТП (то есть толщины защитной щечки). При увеличении толщины покрытия основание ОК отодвигается вниз на соответствующее расстояние.

Область решения КЭ модели представлена моделью вакуума. Единственным источником возбуждения является обмотка возбуждения *Wв*. Электрическая схема КЭ модели ВТП представлена на рисунке 4, б. Генератором сигнала возбуждения является источник напряжения. Измерительная и компенсационная обмотки включены последовательно встречно, тем самым компенсируя начальную ЭДС обмоток, наблюдаемую при отнесении ВТП от объекта контроля.

В процессе КЭ моделирования программой создается начальная, весьма грубая, сетка КЭ. После вычисления уравнений, во всех узлах сетки КЭ определяются участки с наибольшим градиентом магнитного поля. В этих участках сетка учащается, после чего производится второе, адаптивное, вычисление уравнений во всех точках учащенной сетки КЭ. Этот процесс должен повторяться до тех пор, пока не будет достигнут заданный уровень точности или до достижения заданного ограничения числа адаптивных вычислений. Рассматриваемый адаптивный процесс построения сетки КЭ позволяет локально уменьшить размер базового элемента сетки КЭ модели. В результате получается сетка конечных элементов с неравномерным распределением точек в зоне высокого градиента магнитного поля (рис. 5).

Выходным сигналом КЭ модели ВТП являются действительная и мнимая составляющие вносимой ЭДС измерительной обмотки. На рисунке 6, а показаны сигналы КЭ модели ВТП на комплексной плоскости, показаны локальные годографы удельной электрической проводимости основания ОК (σ) и толщины диэлектрического покрытия (h).

Для анализа качества КЭ модели следует использовать информативные параметры, соответствующие используемому алгоритму обработки сигналов ВТП. Для анализируемого алгоритма в виде допущения удобно, в качестве информативного параметра использовать амплитуду A сигнала КЭ модели ВТП.

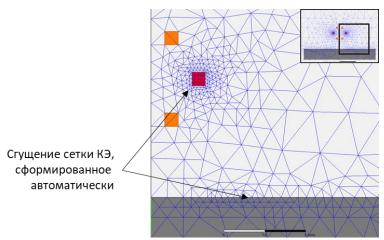


Рис. 5. Сетка конечных элементов

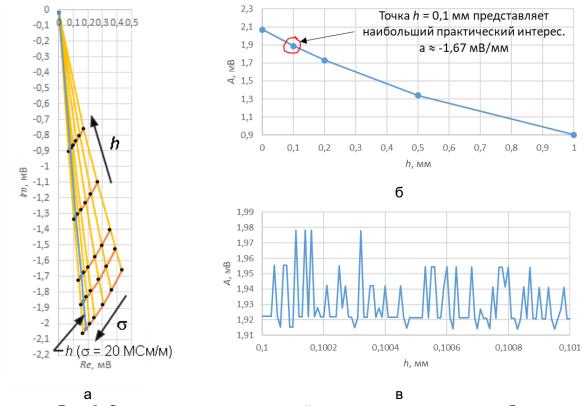


Рис. 6. Сигналы конечно-элементной модели вихретокового преобразователя: a) — локальные годографы h и σ на комплексной плоскости, δ) — зависимость амплитуды сигнала от h в диапазоне от 0 до 1 мм, ϵ) — зависимость амплитуды сигнала от h в диапазоне от 0.1 до 0.101 мм

Рассмотрим локальный годограф h ($\sigma = 20$ МСм/м), показанный на комплексной плоскости голубым цветом. На рисунке 6, (6) приведена зависимость амплитуды сигнала K модели ВТП от h в диапазоне от 0 до 1 мм. Точка h = 0,1 мм представляет наибольший практический интерес. Рассмотрим в более крупном масштабе участок этой линии в окрестности значения h = 0,1 мм, рисунок 6, (6). В таком масштабе становятся видны выбросы, характеризующие прецизионность модели. Для измерения значения этих выбросов целесообразно нормировать график по формуле (1).

$$A' = A - a \cdot h - b, \tag{1}$$

где A' — нормированная амплитуда сигнала КЭ модели ВТП, a и b — коэффициенты нормирования, вычисляемые по формулам (2) и (3):

$$a = \frac{A_{K} - A_{H}}{h_{K} - h_{H}},\tag{2}$$

$$b = A_{H} - a \cdot h_{H}. \tag{3}$$

На рисунке 7 приведен график A' — амплитуды сигнала КЭ модели ВТП, нормированной для анализа прецизионности расчета сигналов КЭ модели ВТП в окрестности короткого фрагмента характеристики ВТП. Зная средний наклон характеристики ВТП, можно вычислить зависимость отклонения результата измерения толщины покрытия Δh от h в окрестности точки h=0,1 мм по формуле (4):

$$\Delta h = \frac{A'}{a}.\tag{4}$$

График зависимости Δh от h по форме полностью повторяет график зависимости A' от h, он отображен на том же графике с помощью дополнительной оси ординат, но имеет инвертированное обозначение шкалы ввиду того, что чувствительность имеет отрицательное значение. Этот график является графиком вариации расчета показаний КЭ модели ВТП толщиномера и удобен для оценки прецизионности расчета сигналов КЭ модели ВТП в рамках решаемой задачи.

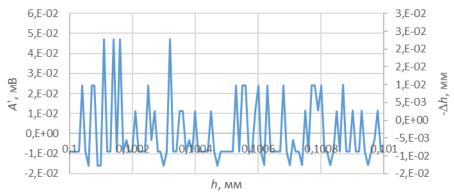


Рис. 7. Зависимость A' и - Δh от h

Из рисунка 7 видно, что вариация показаний имеет значение 40 мкм, что не удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ модели.

При моделировании ВТП методом КЭ основным фактором, влияющим на прецизионность расчета сигналов КЭ модели ВТП, является сетка конечных элементов, а именно, перестроение сетки от решения к решению.

Критическим местом в рассматриваемой КЭ модели ВТП является поверхностный слой основания ОК, в котором наблюдается сильный градиент поля вихревых токов. Изменение сетки в этом слое оказывает наибольшее влияние на прецизионность расчета сигналов КЭ модели ВТП и вызывает выбросы, наблюдаемые на рисунке 7. Рекомендуемым способом устранения этого недостатка КЭ модели является ручное задание правил построения сетки конечных элементов в критическом месте. Для этого оптимальным является построение четырех-пяти дополнительных слоев сетки конечных элементов в поверхностном слое, толщина которого соответствует глубине проникновения вихревых токов, δ , вычисляемой по формуле (5).

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{2\pi f \sigma \mu_0}},\tag{5}$$

где f – частота возбуждения ВТП, μ_0 – магнитная постоянная.

На рисунке 8, а приведено изображение сетки конечных элементов с добавлением дополнительных слоев. Из графика на рисунке 8, б видно, что вариация показаний составляет не более 1 мкм, однако, наблюдаются единичные выбросы свыше 1 мкм, что не удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ модели.

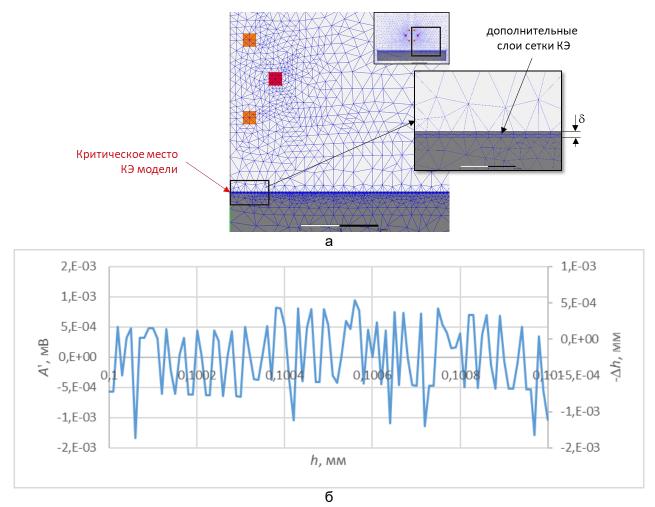


Рис. 8. Добавление дополнительных слоев сетки конечных элементов: а) сетка конечных элементов, б) зависимость A' и -∆h от h

При анализе изменений в сетке конечных элементов, наблюдаемых на анимационной картине, видно, что в точках, соответствующих выбросам, происходит ступенчатое изменение сетки КЭ в области между ВТП и основанием ОК, что говорит о том, что эта область также оказывает существенное влияние на прецизионность расчета сигналов КЭ модели ВТП. Простое задание учащенной сетки в области между ВТП и основанием ОК приведет к необоснованному учащению сетки во всем пространстве построения КЭ модели, занятом неэлектропроводящими объектами. По этой причине целесообразно выделить соответствующий участок пространства между ВТП и основанием ОК, в который будут входить все обмотки ВТП.

На рисунке 9, а показана область КЭ модели с заданным вручную учащением сетки конечных элементов, она так же является критическим местом КЭ модели. Видно учащение сетки в этой области, заданное вручную, на краю модели видна неучащенная сетка, а возле границы критического места наблюдается переходная зона с постепенным учащением сетки конечных элементов, сформированным автоматически.

Из графика на рисунке 9, б видно, что вариация расчета показаний представленной КЭ модели ВТП толщиномера не превышает \pm 0,07 мкм, что удовлетворяет сформулированным критериям качества КЭ модели ВТП для поставленной задачи.

Для оценки погрешности измерения КЭ модели ВТП, с целью её валидации, проведено сравнение результатов КЭ моделирования и измерений, полученных на изготовленном ВТП. Ввиду сложности изготовления большого числа мер толщины покрытия, толщина которых изменяется с малым шагом, для проведения испытаний использовалась специально изготовленная установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия, изображенная на рисунке 10.

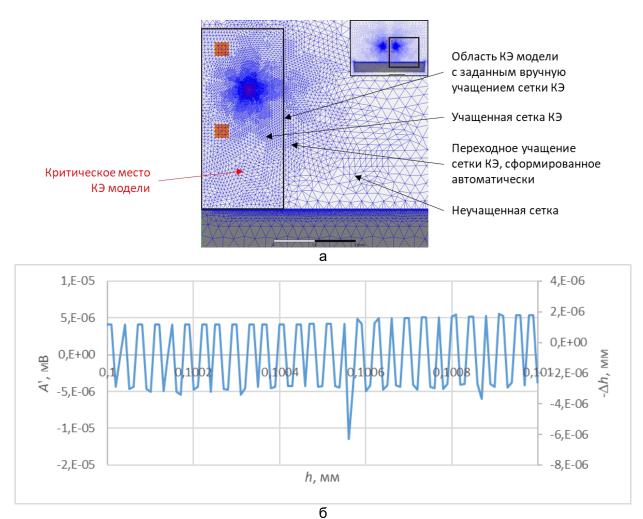


Рис. 9. Учащение сетки в пространстве между ВТП и основанием ОК: а) сетка конечных элементов, б) зависимость A' и -∆h от h

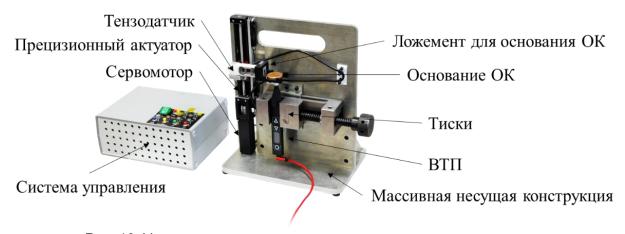


Рис. 10. Установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия

Установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия состоит из прецизионного актуатора, построенного на ШВП малого шага, с приводом от сервомотора. На подвижной каретке закреплен тензодатчик с ложементом, в который укладывается основание ОК. С помощью тисков закрепляется испытуемый ВТП. Все компоненты конструкции закреплены на массивной несущей конструкции. Система управления расположена в отдельном корпусе.

Установка-имитатор толщины диэлектрического покрытия работает по следующему алгоритму:

- производится перемещение основания ОК вниз до момента касания контактной поверхности ВТП;
- производится определение момента касания с использованием сигнала, сформированного тензодатчиком;
- вычисляются координат точки касания с использованием макроса движения;
- основание ОК подводится в точку, соответствующую значению h = 0;
- производится ступенчатое перемещение основания ОК вверх по заданной управляющей программе;
- считывание сигнала ВТП производится во время остановки по сигналу достижения заданной позиции, сформированного серводрайвером;
- при достижении основанием ОК зазора, соответствующего пределу измерения ВТП производится замена основания ОК вручную на следующее, имеющее другое значение σ;
- производится повторение цикла для каждого основания ОК.

Для проведения испытаний в качестве оснований ОК использованы меры удельной электрической проводимости цветных металлов СО-230 [5]. Выбраны следующие значения h: 0; 0,1; 0,2; 0,5; 1 мм. Абсолютная погрешность выставления h не превышает \pm 4 мкм.

Непосредственное сравнение результатов измерений с результатами расчёта КЭ модели ВТП невозможно, необходимо провести нормализацию сигналов, полученных с ВТП. Эта процедура необходима из-за того, что на сигнал ВТП оказывают воздействие ряд технологических параметров, не учитываемых в КЭ модели. Эти параметры приводят к возникновению искажений сигналов трех видов: масштабирование, поворот и смещение сигналов на комплексной плоскости.

Для нормализации сигналов ВТП необходимо использовать, как минимум, две точки на комплексной плоскости, соответствующие каким-либо характерным сигналам ВТП. В качестве первой точки следует использовать сигнал ВТП на воздухе ($h = \infty$). Этот сигнал традиционно используется для автоматической калибровки ВТП. В качестве второй точки выбран сигнал, полученный при установке ВТП на меру толщиной 0,1 мм на медном основании с $\sigma = 58,8$ МСм/м. Этот выбор обусловлен тем, что этот сигнал имеет амплитуду, близкую к максимальной, что уменьшает вес инструментальной погрешности, и не подвержен влиянию погрешности выставления нуля, характерной для установки-имитатора толщины покрытия. Операции нормализации сигналов ВТП сводятся к совмещению упомянутых характерных точек.

Алгоритм нормализация включает в себя три этапа:

Этап 1 – масштабирование сигналов ВТП на комплексной плоскости по формуле (6):

$$\begin{cases}
Re' = k \cdot Re_{\text{BTII}} \\
Im' = k \cdot Im_{\text{RTII}}
\end{cases}$$
(6)

где k – коэффициент масштабирования, вычисляемый по формуле (7):

$$k = \frac{\sqrt{(Re(Cu) - Re(Air))^2 + (Im(Cu) - Im(Air))^2}}{\sqrt{(Re_{BT\Pi}(Cu) - Re_{BT\Pi}(Air))^2 + (Im_{BT\Pi}(Cu) - Im_{BT\Pi}(Air))^2}}.$$
(7)

Этап 2 — поворот сигналов ВТП на комплексной плоскости относительно начала координат по формуле (8):

$$\begin{cases}
Re'' = Re' \cdot cos(\alpha) - Im' \cdot sin(\alpha) \\
Im'' = Re' \cdot sin(\alpha) + Im' \cdot cos(\alpha)
\end{cases}$$
(8)

где α – угол поворота, вычисляемый по формуле (9):

$$\alpha = a \tan \left(\frac{(Im_m(Cu) - Im_m(Air))}{(Re_m(Cu) - Re_m(Air))} \right) - a \tan \left(\frac{(Im(Cu) - Im(Air))}{(Re(Cu) - Re(Air))} \right). \tag{9}$$

Этап 3 — совмещение начал координат на комплексной плоскости путем смещения сигналов ВТП по формуле (10):

$$\begin{cases}
Re''' = Re'' + Re_{\text{CM}} \\
Im''' = Im'' + Im_{\text{CM}}
\end{cases}$$
(10)

где (Re_{CM} ; Im_{CM}) — вектор смещения, вычисляемый по формуле (11):

$$\begin{cases}
Re_{\text{CM}} = Re(Air) - Re''(Air) \\
Im_{\text{CM}} = Im(Air) - Im''(Air)
\end{cases}$$
(11)

На рисунке 11 показан результат преобразований на разных этапах нормализации.

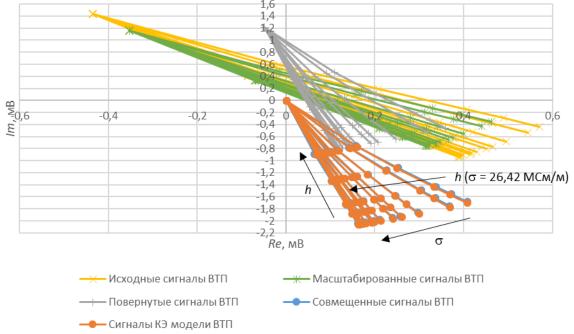


Рис. 11. Нормализация сигнала ВТП

Для детального сравнения сигналов рассмотрим подробно локальный годограф h (σ = 26,42 MCм/м). Для этого необходимо вычислить значение нормализованной амплитуды сигнала ВТП по формуле (12):

$$A''' = \sqrt{Re'''^2 + Im'''^2}.$$
 (12)

На рисунке 12 приведены зависимости амплитуды сигнала КЭ модели ВТП (A), нормализованной амплитуды сигнала ВТП (A") и разницы между ними (ΔA) от h; график ΔA приведен в масштабе вспомогательной шкалы ординат.

Из рисунка 12 видно, что величина ΔA не превышает \pm 7 мкВ во всем диапазоне h, что примерно соответствует отклонению при измерении амплитуды сигнала ВТП на \pm 0,5% или отклонению при измерении h в окрестности h=0,1 мм не превышающему \pm 4 мкм. Аналогичные результаты наблюдаются при детальном анализе остальных локальных годографов.

Учитывая параметры точности установки-имитатора толщины диэлектрического покрытия (повторяемость ± 3 мкм и дифференциальная нелинейность ± 4 мкм), подтвержденные при её испытании с применением средств измерения более высокого класса точности, можно сделать предположение о том, что поставленная задача построения высокоточной КЭ модели ВТП достигнута, прецизионность и погрешность результатов расчета сигналов КЭ модели ВТП обеспечивают погрешность метода измерения не более $\pm (0,001\ h+0,1)$ мкм.

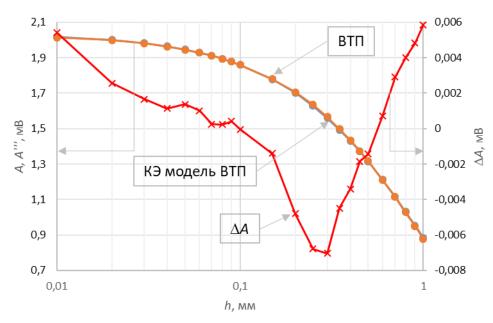


Рис. 12. Зависимости A, A" и ΔA от h

Выводы:

- предложен принцип количественной оценки метрологических характеристик конечноэлементных моделей вихретоковых преобразователей, позволяющий сопоставлять их с метрологическими характеристиками проектируемых вихретоковых средств измерения, в составе которых будут применяться моделируемые вихретоковые преобразователи;
- сформулированы численные критерии оценки качества конечно-элементных моделей вихретоковых преобразователей и принципы их установления, обеспечивающие возможность проведения оценки качества конечно-элементных моделей;
- разработан способ и методика построения сетки конечных элементов, учитывающие особенности структуры высокочастотного вихретокового преобразователя, объекта и задачи контроля, позволяющий достичь требуемых метрологических характеристик, что позволяет провести оценку погрешности метода, реализуемого с использованием рассматриваемого алгоритма измерения толщины покрытия;
- разработана модель «вихретоковый преобразователь объект контроля», удовлетворяющая заданным метрологическим характеристикам, разработан способ и оборудование её верификации, подтвердившие сходимость результатов моделирования и результатов испытаний интеллектуального вихретокового преобразователя, являющегося средством измерения.

Список использованных источников:

- 1. ГОСТ Р ИСО 2360-2021 Неэлектропроводящие покрытия на немагнитных электропроводящих металлических основаниях. Измерение толщины покрытия. Амплитудный вихретоковый метод.
- 2. Syasko M., Solomenchuk P., Soloviev I., Ampilova N. A Technique for Multi-Parameter Signal Processing of an Eddy-Current Probe for Measuring the Thickness of Non-Conductive Coatings on Non-Magnetic Electrically Conductive Base Metals. Appl. Sci. 2023, 13, 5144. https://doi.org/10.3390/app13085144.
- 3. Ansoft Maxwell 3D Field Simulator v11 User's Guide.— USA Pittsburg PA: Suite 200, Ansoft corporation, 2006. 675 c.
- 4. РМГ 29-2013 Государственная система обеспечения единства измерений. Метрология. Основные термины и определения.
- 5. Описание типа средства измерения. «Меры удельной электрической проводимости CO- 230» № 63172-16.

УДК 004.032.26+004.92+004.946

РАЗРАБОТКА СПОСОБА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА

Шадрина И.Г. ¹ (студент) **Научный руководитель** – ассистент Киприянов К.В. ¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: Shadrina.IG.itmo@gmail.com

В работе рассмотрены подходы к генерации трехмерных моделей с использованием нейросетевых алгоритмов, таких как Text-to-3D, CV 3D реконструкция и Neural Radiance Field, а также проведен анализ возможностей практического применения данных алгоритмов в технологической подготовке производства и существующие ограничения при внедрении, в том числе при проведении обучения персонала.

Ключевые слова

Нейронные сети, глубокое обучение, реконструкция трехмерной сцены, 3Д моделирование, технологическая подготовка производства, обучение персонала.

Область исследования нейронных сетей обладает широким потенциалом для практического применения в различных сферах, включая производственный сектор, где их последовательная интеграция может привести к революционным изменениям в процессах и подходах обеспечению эффективности.

Применение нейронных сетей предлагает возможности повышения точности и гибкости процессов проектирования за счет обучения на основе имеющихся данных, прогнозирования и оптимизации возможных результатов производственной деятельности, сокращения количества ошибок и потерь. Кроме того, нейронные сети могут значительно упростить этап создания прототипов, позволяя быстро тестировать и дорабатывать дизайн за счет преобразования 2D проектов в 3D модели, а также упрощения создания проектных моделей производственных линий и анализа их фактического состояния. Развивающаяся область генерации моделей из текста в 3D открывает новые возможности для концептуализации и создания сложных инструментов непосредственно из текстовых описаний.

Целью данной статьи является исследование нейросетевых алгоритмов, применяемых в задаче генерации трехмерных моделей, выявление наиболее перспективного алгоритма для процессов ТПП и разработка соответствующего подхода его использования.

Процесс работы Text-to-3D обычно имеет следующие шаги: ввод текстового запроса, интерпретация запроса, первичное создание 3D модели, уточнение и детализация 3D модели, финализация и демонстрация результатов моделирования пользователю. Каждый шаг включает в себя дополнительные алгоритмы и модели нейронных сетей. Примеры различных подходов в реализации алгоритмов класса text-to-3d представлены на рисунках 1 [2] и 2 [3].

Несмотря на большое количество работ на тему создания трехмерных объектов из текстового описания, данный подход к созданию трехмерных объектов обладает рядом недостатков:

- 1. Плохая геометрия и текстуры: неправильные формы, недостаточная детализация моделей или артефакты, связанные с искажениями во время преобразования.
- 2. Текстовые инструкции могут быть неоднозначными или вводить в заблуждение модель, что приводит к неверным результатам (рис. 3).
- 3. Необходимость предварительного обучения для получения более предсказуемого результата в специализированном применении.

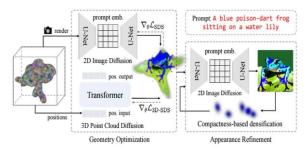


Рис. 1. Архитектура Text-to-3D, представляющая непрерывный поток с оптимизацией геометрии и доработкой внешнего вида

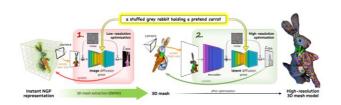


Рис. 2. Архитектура Text-to-3D с двухэтапным процессом, сначала создавая модель с низким разрешением и дорабатывая ее



Рис. 3. Примеры генерации 3Д моделей по текстовому запросу «Shaft with keyway»

Область CV реконструкции содержит в себе много методов и подходов, большинство алгоритмов имеет следующие этапы: подготовка входных 2D-изображений к обработке (нормализация, обесцвечивание, выравнивание и т. д.), извлечение и сопоставление признаков, оценка геометрии на основе сопоставления и оптимизация, построение 3D модели объекта. Эти этапы могут варьироваться в зависимости от конкретной используемой методики и сложности моделируемых объектов.

3D-реконструкция с использованием Computer Vision имеет первые продукты и исследования начальных стадий в различных отраслях. Такая технология может служить инструментом автоматизации дизайна строительства, ведутся поиски решения в области медицины для улучшенной анатомической визуализации. Более зрелые решения можно встретить в оцифровке одежды по фото и в сфере цифровых развлечений для создания гиперреалистичных аватаров (рис. 4).



Рис. 4. Примеры создания карты глубины для 3Д аватаров по фото

Современные подходы к 3D реконструкции с использованием CV сталкиваются с ограничением по ширине номенклатуры возможных объектов реконструкции. Разработка методов, требующих менее обширных и сложных наборов обучающих данных, является ключевой задачей, которые потенциально могут быть решены с развитием Large Language Model [4].

NeRF — нейронная сеть, в которой обучение модели происходит по принципу Supervised Learning. Входными данными для NeRF являются вектора пространственных координат точки p=(x,y,z), направления взгляда $d=(\theta,\phi)$, где θ и ϕ - углы, описывающие направление взгляда из данной точки. Целевыми данными для обучения являются RGB значение цвета c=(r,g,b) в точке и скалярная величина плотности σ , характеризующая количество света поглощается или рассеивается в данной точке. Оригинальное представление архитектуры в виде визуализации представлено на рисунке 5.

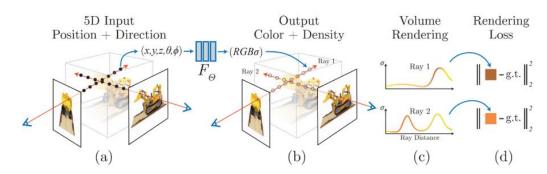


Рис. 5. Пример работы алгоритма NeRF из оригинальной статьи [5]

Одно из ключевых преимуществ NeRF — это способность быстро и точно воссоздавать по фото не только объекты, но и окружение.

Разработка компании NVIDIA, Instant-NGP сокращает длительный процесс обучения NeRF до 20 секунд, сохраняя при этом высокое качество фотореалистичных результатов [6]. Разработка NVIDIA не только означает значительный скачок в создании 3D сцен «как есть», но и иллюстрируют огромный потенциал инструментов, основанных на искусственном интеллекте, в создании эффективных и высококачественных 3D-моделей и сцен, в том числе для задач виртуальной и дополненной реальности.

Технологическая подготовка производства (ТПП) — вид производственной деятельности предприятия (группы предприятий), обеспечивающей технологическую готовность производства к изготовлению изделий, отвечающих требованиям заказчика или рынка данного класса изделий [1]. Понятие обучения в контексте ТПП означает передачу знаний, навыков и компетенций сотрудникам, необходимых для эффективного выполнения задач во время работы с оборудованием и инструкциями, соблюдения безопасности и других аспектов производственной деятельности. Внедрение инновационных методов обучения, таких как использование нейросетей NeRF, может значительно улучшить процесс обучения, сделав его более интерактивным, наглядным и активно обновляемым.

Для создания интерактивного стенда с использованием нейросети NeRF необходимо провести фото, согласно рекомендациям съемку сцены, первичную обработку изображений на предмет исключения плохих кадров (нечетких, перевернутых, с лишними предметами и т. д.). После предварительной обработки необходимо создать файл с расширением json в программе COLMAP, который будет содержать информацию о координатах положения камеры для каждого снимка. Далее папка, содержащая json-файл и исходные фотографии загружается в программу InstantNGP и, при правильно подготовленных данных, нейронная сеть начинает обучение. Результаты построения сцены производственного помещения с оборудованием (время обучения: около пяти минут) представлены на рисунке 6. InstantNGP также позволяет посмотреть сцену в формате подключения гарнитуры виртуальной реальности (Virtual Reality, VR).



Рис. 6. Пример работы алгоритма NeRF при построении сцены с промышленным роботом по фотографиям

Анализ основных эффектов от внедрения нейросети NeRF в процессы обучения сотрудников производства представлены в таблице.

Эффекты внедрения нейронной сети NeRF

Таблица

До внедрения NeRF в процесс обучения	После внедрения NeRF в процесс				
сотрудников	обучения сотрудников				
Со стороны обуч	нающегося				
Преимущественно получает знания с	Обучается с интерактивными модулями, в				
использованием текстовых материалов	том числе и с использованием VR				
Может отработать навыки на реальном оборудовании только в ограниченное время	 не ограничен в частоте 				
Редкие виды оборудования могут быть недоступны для изучения	использования тренажеров; – обладает актуальной информацией				
Допуск на производственные объекты ограничен	о производстве				
Подвергается оценке знаний на основе	Оценен на основе его способности				
тестирования, без оценки реального поведения	взаимодействовать в виртуальной среде				
Со стороны центра обучения					
Сложности в создании большого количества интерактивных обучающих модулей из-за дороговизны и длительности разработки	Способен к систематической разработке и обновлению обучающих интерактивных модулей, соблюдая фиксированные временные рамки и минимизируя затраты				

В результате работы было проведено исследование применимости нейросетевых алгоритмов для создания 3D моделей и успешно продемонстрировано использование Neural Radiance Fields (NeRF) для создания реалистичных сцен производства. Этот подход позволит достичь высокой скорости генерации 3D-моделей, снизить себестоимость процесса, обеспечить интерактивность и быструю адаптацию к различным производственным сценариям при необходимости обучения сотрудников.

Список использованных источников

1. Государственный стандарт Российской Федерации технологическая подготовка производства. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/1200025648 (дата обращения: 01.01.2024).

- 2. Chen Z., Wang F., Liu H. Text-to-3d using gaussian splatting // arXiv preprint arXiv:2309.16585. 2023.
- 3. Lin C.H. et al. Magic3d: High-resolution text-to-3d content creation // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. 2023. Pp. 300–309.
- 4. Liu D. et al. Uni3D-LLM: Unifying Point Cloud Perception, Generation and Editing with Large Language Models // arXiv preprint arXiv:2402.03327. 2024.
- 5. Mildenhall B. et al. Nerf: Representing scenes as neural radiance fields for view synthesis // Communications of the ACM. − 2021. − T. 65. − №. 1. − Pp. 99–106.
- 6. Müller T. et al. Instant neural graphics primitives with a multiresolution hash encoding // ACM Transactions on Graphics (ToG). 2022. T. 41. №. 4. Pp. 1–15.

УДК 67.05

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛОМ

Шурмелев Д.Д. 1 (студент) Научный руководитель — к.т.н., доцент Елисеев Д.П. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: shurmelevdanil856@gmail.com

В работе описаны аддитивное производство, его классификация, технологии и методы, применение аддитивного производства в промышленности. Исследовано современное состояние развития 3D-принтеров, печатающих металлом, отечественных и зарубежных производителей. Полученные данные разделены на три группы, в зависимости от размеров рабочей области: 1) до 200х200х200 мм; 2) от 200х200х200 мм до 400х400х400 мм; 3) от 400х400х400 мм. Приведена сравнительная характеристика исследованных 3D-принтеров.

Ключевые слова

Индустрия 4.0, аддитивное производство, Bed Deposition, Direct Deposition, метод печати, печать металлом, 3D-принтеры.

Одной из самых актуальных тем современной промышленности, которую отмечают зарубежные и отечественные специалисты, является Индустрия 4.0, подразумевающая интеграцию производственных процессов и ИТ-решений. К наиболее передовым чертам Индустрии 4.0 принято относить аддитивное производство и использование 3D-принтеров для изготовления металлических изделий в промышленности [1-2]. 3D-печать металлами, по сравнению с классическими методами изготовления изделий, позволяет:

- достичь наибольшей точности изделия;
- выполнять изделия сложной геометрии;
- получать лучшие физические и механические свойства;
- экономить материал;
- уменьшить цикл производства и массогабаритные характеристики изделия.

Однако, вследствие уменьшения поставок зарубежных 3D-принтеров и невозможности их технического обслуживания, остро встает вопрос о поиске аналогов у отечественных и восточных производителей.

Цель работы заключается в исследовании современного состояния развития 3D-принтеров, печатающих металлами, сравнение зарубежных, отечественных и восточных 3D-принтеров, определение их достоинств и недостатков.

Для достижения поставленной цели в работе решены следующие задачи — изучение принципов 3D-печати металлами и изучение рынка доступных установок.

Аддитивное производство – это изготовление изделия на основе данных цифровой модели детали, узла или прибора, посредством послойного добавления материала. То есть суть аддитивного производства заключается в добавлении материала для получения изделия, в отличие от механической обработки, где материал снимают или вычитают от общей массы заготовки. Материалы, используемые в аддитивном производстве, можно разделить на следующие группы:

- жидкие (фотополимеры акриловые и эпоксидные);
- сыпучие (полимеры, песок, металлический порошок);
- прутковые, нитевидные (полимеры, металлы);
- листовые, пленочные (ПВХ-пленки, фольга, листовой прокат).

В соответствии с классификацией, аддитивное производство принято разделять на две основные технологии – Bed Deposition и Direct Deposition.

Технология Bed Deposition заключается в создании на рабочей поверхности равномерного слоя порошкового материала, который в дальнейшем подвергается сплавлению, при помощи лазера или иным способом. В зависимости от способа фиксации материала и способа формирования слоя, в технологию Bed Deposition входят следующие методы [3]:

- SLM Selective Laser Melting;
- SLS Selective Laser Sintering;
- SLA Stereolithography Apparatus;
- DMLS Direct Metal Laser Sintering;
- DLP Data Leakage Protection;
- EBM Electron Beam Melting;
- Laser CUSING:
- LOM Laminated Object Manufacturing;
- SPLS Solid Phase Laser Sintering;
- Ink-Jet, Binder Jetting.

Технология Direct Deposition представляет собой прямое или «непосредственное» нанесение из газопорошковой струи металлических частиц. Материал (пруток, паста, вдуваемый порошок) подается в то же место, куда подводится энергия лазера и формируется изделие. Лазер оплавляет участок выращиваемого изделия, формируя локальную ванну жидкого расплава. Металлический порошок внедряется в расплав при помощи струи инертного транспортирующего газа, чаще всего используют высокочистый аргон. В технологию Direct Deposition входят следующие методы [3]:

- DMD Direct Metal Deposition;
- LENS Laser Engineered Net Shape;
- DLF Directed Light Fabrication;
- DLP Digital Light Processing;
- LOM Laminated Object Manufacturing;
- Poly-Jet, Ink-Jet;
- DM Direct Manufacturing;
- FDM Fused Deposition Modeling;
- − DoD − Drop on Demand;
- MJS Multiphase Jet Solidification.

Наиболее распространенными в машиностроительной отрасли являются методы — SLA, SLS, SLM, DLP, DMD, FDM и Binder Jetting. Это связано с тем, что данные методы позволяют достичь наибольшей точности готового изделия, а также широко применяются в разнообразных сферах. SLA, DLP, SLS методы используются в производстве для изготовления оснастки, литейных форм, «поддержек», прототипов или функциональных изделий, то есть выполняют вспомогательные функции для дальнейших изделий, напечатанных из металлов или сплавов.

Схема 3D-принтера, печатающего металлом, и схема печати представлены на рисунках 1 и 2.

Процесс печати на 3D-принтере можно описать следующим алгоритмом:

- нанесение материала на платформу построения или загрузка материала в сопло лазера;
- формирования слоя изделия за счет сплавления или выдавливания материала по определенной траектории;
- опускание платформы построения и выполнение последующих слоев, до полного изготовления изделия.

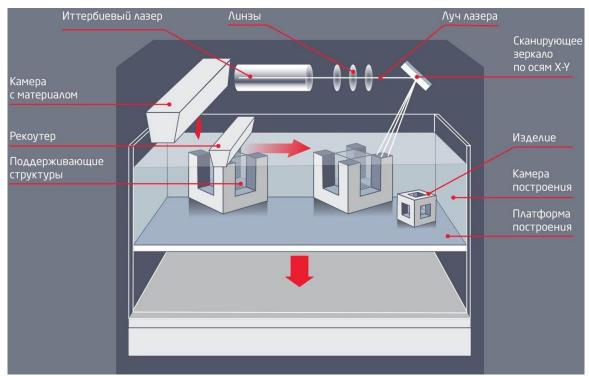


Рис. 1. Основные компоненты 3D-принтера

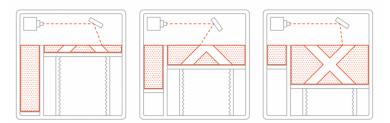


Рис. 2. Схема печати изделия на 3D-принтере

Для каждого из приведенных выше методов существует огромное количество принтеров для 3D-печати как зарубежных, так и отечественных. Сравнительная характеристика промышленных принтеров для 3D-печати металлами приведена в таблицах 1, 2, 3 [4, 5].

Таблица 1 Принтеры с размером рабочей области до 200x200x200 мм

принтеры с размером рассчей осласти до 200х200х200 мм						
Помисоморомию	Характеристики					
Наименование	Стоимость,	Размер рабочей	Точность,	Толщина	Страна	
модели	p.	области, мм	MM	слоя, мкм	производитель	
TruPrint 1000	32 000 000	100x100x100	до 0.1	10-50	Германия	
EOS M 100	32 000 000	100x100x95	до 0.1	40	Германия	
DMP Flex 100	36 355 000	100x100x90	0.05	от 20	США	
SLM Solutions 125	36 355 000	125x125x125	0.01	20-75	Германия	
Xact Metal XM200C	8 800 000	127x127x127	0.02	20-50	США	
3D Systems DMP Flex 200	50 000 000	140x140x115	0.05-0.1	10-120	США	
Markforged MetalX	9 000 000	300x200x180	0.05	50-200	США	
Digital Metal DM P2500	32 000 000	200x180x69	0.01	от 40	Швеция	
3DLAM Mini	7 000 000	90x90x100	0.02	20-100	Россия	
3DLAM Mid	15 000 000	150x150x220	0.02	20-100	Россия	

Продолжение таблицы 1

Наименование	Характеристики				
модели	Стоимость, р.	Размер рабочей области, мм	Точность, мм	Толщина слоя, мкм	Страна производитель
AM.TECH AMT- 16	18 000 000	160x160x250	0.1	30-200	Россия
AM.TECH EBM- 150	35 000 000	175x175x175	до 0.1	30-200	Россия
AddSol S90	12 000 000	90x90x90	0.02	от 20	Россия
Onsint AM150	15 000 000	150x150x200	До 0.1	20-80	Россия
H3D LACM 100	18 200 000	105x105x100	0.01-0.1	от 10	Китай
H3D LACM 150	22 725 000	150x150x100	0.01-0.1	от 10	Китай
Farsoon FS121M	27 270 000	120x120x100	0.04	20-80	Китай
EPlus-3D EP- M150	22 725 000	150x150x140	0.02-0.1	20-100	Китай

Таблица 2 Принтеры с размером рабочей области от 200x200x200 до 400x400x400 мм

	Характеристики				
Наименование модели	Стоимость,	Размер рабочей	Точность,	Толщина	Страна
	p.	области, мм	MM	слоя, мкм	производитель
Renishaw RenAM 500 Series	90 900 000	245x245x335	0.02-0.1	От 20	Великобритания
GE Concept Laser M2 Series 5	90 900 000	245x245x350	0.02-0.12	25-120	США
Nexa3D QLS 236	90 900 000	230x230x250	0.2	60-300	США
HP Metal Jet	58 000 000	430x320x200	0.01-0.5	70-120	США
Rapidia Metal Conflux 1	67 575 000	200x280x200	0.2	до 75	Канада
Pam Series MC Pollen AM	110 000 000	300x300x300	0.05	от 40	Франция
Triditive Amcell	63 275 000	300x300x350	0.01	от 30	Испания
XJet Carmel 700M	56 905 000	501x140x200	0.01	от 8	Израиль
AM.TECH AMT- 32	80 000 000	300x300x420	0.01-0.2	30-200	Россия
AM.TECH MBJ- 400 PRO	50 000 000	400x220x200	0.01-0.1	30-200	Россия
AddSol D250	50 000 000	250x250x400	0.01-0.1	от 20	Россия
Onsint AM300	40 000 000	320x320x400	0.01-0.2	20-100	Россия
Лазерные системы M250	80 000 000	250x250x250	0.1	20-100	Россия
RusMelt-3D	80 000 000	300x300x370	0.2	70-150	Россия
ProtoFab PF-M 280	45 500 000	250x250x300	0.1	50-200	Китай
HBD-350	45 500 000	325x325x400	0.05-0.2	30-100	Китай
Farsoon FS273M	64 000 000	275x275x355	0.05-0.1	20-100	Китай
Zrapid iSLM280	45 500 000	300x250x350	0.05-0.4	20-50	Китай
Farsoon FS301M	72 750 000	305x305x400	0.05-0.1	20-100	Китай
EPlus-3D EP- M260	54 550 000	260x260x390	0.02-0.2	20-120	Китай

Таблица 3

Принтеры с размером рабочей области от 400х400х400 мм

Патраморания	Характеристики					
Наименование модели	Стоимость,	Размер рабочей	Точность,	Толщина	Страна	
МОДСЛИ	p.	области, мм	MM	слоя, мкм	производитель	
SLM Solutions NXG XII 600	136 400 000	600x600x600	0.2	80-160	Германия	
Velo3D Sapphire XC 1MZ	150 275 000	600x600x1000	0.05-0.15	10-250	США	
Sciaky EBAM 300	220 000 000	5791x1219x1219	0.3	10-600	США	
Formalloy L- Series	196 000 000	1000x1000x1000	0.5	10-500	США	
Spee3D WarpSPEE3D	172 500 000	1000x1000x700	0.25	до500	Австралия	
AM.TECH AMT- 64	130 000 000	600x600x600	0.02-0.4	50-250	Россия	
AM.TECH MBJ- 500 PRO	110 000 000	500x450x400	0.02-0.3	40-200	Россия	
ИЛИСТ-L-3D	135 000 000	1300x1300x600	0.1	до 500	Россия	
HBD-E500	100 000 000	430x520x520	0.05-0.2	30-100	Китай	
EPlus-3D EP- M825	182 000 000	833x833x1000	0.1	20-120	Китай	
Farsoon FS721M	136 400 000	720x420x420	0.1	20-100	Китай	

На основании сравнительной характеристики, исследованного зарубежного и отечественного рынков 3D-принтеров, можно сделать следующие выводы:

Большее количество 3D-принтеров, печатающих металлами, представлено западными фирмами (США и Европа), их 3D-принтеры имеют больший функционал и лучшее качество сборки, по сравнению с отечественными и восточными фирмами (Китай). К недостаткам западных 3D-принтеров можно отнести — невозможность предоставления тех. обслуживания, ремонта и замены запчастей 3D-принтера, уменьшение числа поставок 3D-принтеров (некоторые модели невозможно приобрести в настоящее время), средняя стоимость принтеров выше, чем у конкурентов.

Отечественные и восточные 3D-принтеры занимают меньшую область рынка и представлены меньшим количеством фирм, однако они имеют ряд достоинств – качество печати не уступает западным 3D-принтерам, средняя стоимость отечественных 3D-принтеров ниже, чем у остальных, стоимость восточных 3D-принтеры чуть выше отечественных. Главной отличительной чертой отечественных и восточных фирм, по сравнению с западными, является наличие тех. обслуживания 3D-принтеров, возможность замены запчастей и наличие 3D-принтеров в продаже. К недостаткам отечественных и восточных 3D-принтеров можно отнести — качество сборки и функционал хуже, чем у западных. Также стоит отметить, что некоторые отечественные фирмы имеют одну станочную базу, что и восточные производители, отличия заключаются лишь в названиях и дизайне 3D-принтера, например 3D-принтеры АМ.ТЕСН закупают свою продукцию у китайской фирмы LiM.

В результате исследования современного состояния развития 3D-принтеров, печатающих металлом, были описаны методы и технологии аддитивного производства, рассмотрены отечественные и зарубежные 3D-принтеры с размером рабочей области от 200х200х200 мм, от 200х200х200 мм до 400х400х400 мм, до 400х400х400 мм. На основании полученных данных, была составлена сравнительная характеристика зарубежных и отечественных производителей 3D-принтеров, сформулированы выводы.

Список использованных источников

- Manufacturing Digital Transformation and Innovation Primer for 2021. [Электронный ресурс].
 Режим доступа: https://www.gartner.com/en/documents/3996518 (дата обращения: 30.10.2023).
- 2. Четвёртая промышленная революция. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Четвёртая_промышленная_революция (дата обращения: 10.11.2023).
- 3. Аддитивные технологии в машиностроении. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://elib.spbstu.ru/dl/2/3548.pdf/download/3548.pdf (дата обращения: 25.12.2023).
- 4. Компания 3Dtool Интегратор оборудования для 3D-печати и станков с ЧПУ. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://spb.3dtool.ru (дата обращения: 30.12.2023).
- 5. Интегратор и интернет-магазин 3D принтеров. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://top3dshop.ru (дата обращения: 05.01.2024).

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Фотоника и прикладная оптика	
Фотоника и прикладная оптика	

УДК 681.78, 004.932

REVIEW AND ANALYSIS OF TECHNIQUES FOR MULTISPECTRAL IMAGE FUSION

Yuandong S.¹ (student), Scientific Supervisor – PhD Vasiliev A.S. ¹

1 – ITMO University

e-mail: a s vasilev@itmo.ru

Image fusion technology can be divided into traditional image fusion technology and deep learning image fusion technology, the two image fusion methods have different advantages and disadvantages, this paper will elaborate on the characteristics of the various methods and carry out a detailed comparative study in the hope that it can provide auxiliary materials for the development of image fusion technology afterwards.

Keywords

Image fusion, Traditional image fusion methods, Deep learning, Algorithm structure, Comparative analysis.

In order to extract the most meaningful information from different source images and combine the extracted information, multispectral image fusion technology has been developed. Through multispectral image fusion technology, we can obtain more informative images, and the generated images can provide more convenience for subsequent applications [1, 2].

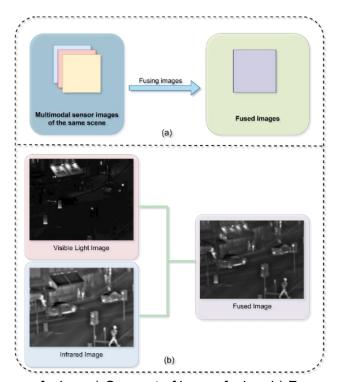


Fig. 1. Traditional image fusion: a) Concept of image fusion; b) Framework of image fusion

Multi-spectral image fusion is mainly used to fuse different images obtained by multi-modal sensors in the same scene, and to fuse different details under different spectral images to the same image, as shown in fig. 1, a, and, as much as possible, more information of the original image should be retained in the fused image, as shown in fig. 1, b, this fusion technique fuses the visible and infrared images of the same scene, to The fused image with richer information and more image details is obtained.

Basic concepts of image fusion methods. The development of image fusion techniques over time is shown in fig. 2. At each key point in time, the figure lists the more representative research efforts.



Fig. 2. Development of image fusion techniques

In the early image fusion technology, the main research method used is the relevant mathematical transformation, which is mainly manually analyze the activity level of the image to be fused in the spatial domain or transform domain, and then design the fusion rules, this fusion method is called the traditional image fusion method [3]. However, there are two obvious limitations of this method, firstly, the traditional method adopts the same mathematical transformation rules for different source images in order to ensure the feasibility of feature fusion in the follow-up, but the same transformation rules will eliminate the specificity of different source images; secondly, the performance of image fusion is limited by the rough feature fusion strategy, and it is usually difficult to deal with the complex image content, especially when the input images have different focus, exposure or dynamic range. In order to overcome these limitations imposed by traditional methods, so deep learning has played an increasingly important role in the field of image fusion in recent years [4–7].

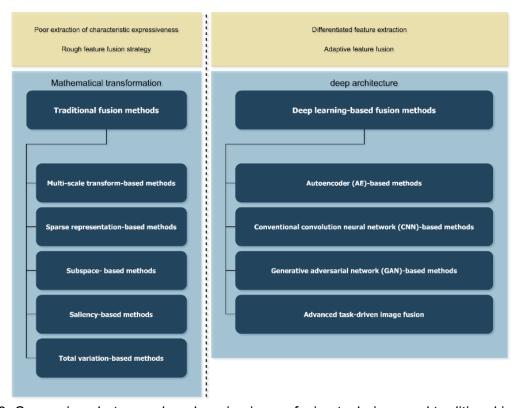


Fig. 3. Comparison between deep learning image fusion technique and traditional image fusion technique

By comparison we can find that the deep learning image fusion strategy has high advantages over the traditional image fusion strategy as shown in fig. 3. For the first limitation of the traditional method, deep learning can use different network branches to extract features specific to the source image; secondly, to improve the feature fusion strategy of the traditional fusion method, deep learning increases the loss function, which can supervise and guide the feature fusion strategy to realize adaptive feature fusion, detailed steps will be described later on.

Firstly, Autoencoder (AE)-based methods are introduced, as shown in fig. 4. Autoencoder methods usually pre-train an autoencoder. Firstly, a series of image features are obtained from different source images by the autoencoder, and then we fuse the features obtained from these two source images into the fused features in the feature fusion strategy, which is implemented according to the traditional fusion rules [8]. At this point we can not directly obtain the fused image, but also need to decode the series of fused features through the decoder in order to obtain different fused images.

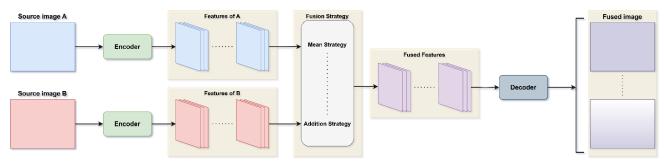


Fig. 4. Autoencoder (AE)-based methods

Second when it comes to Conventional convolution neural network (CNN)-based methods, there are usually two ways to introduce convolutional neural networks into image fusion, one is shown in fig. 5, a, which mainly utilizes a well-designed loss function and network structure to achieve an end-to-end feature extraction, feature fusion and image reconstruction [9]. Relative gradient and intensity based maintenance represents end-to-end CNN approaches [10], which propose a loss of relative gradient and intensity maintenance that steers the network to directly produce embedded images. Fig. 5, b shows another approach where a trained CNN is used to generate fusion rules, while feature extraction and image reconstruction remain the same as in traditional methods [11].

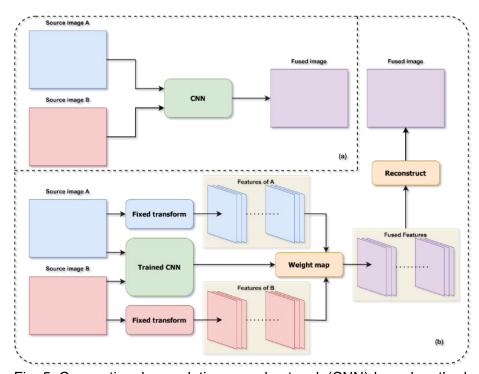


Fig. 5. Conventional convolution neural network (CNN)-based methods

As shown in fig. 6, Generative adversarial network (GAN)-based methods accomplish feature extraction, feature fusion, and image reconstruction by relying on an adversarial game between the generator and the discriminator to estimate the probability distribution of the target [12, 13]. And among the different GAN-based image fusion techniques, the first one to appear and develop is the FusionGAN technique, which can further enrich the texture details of the fused image by establishing an adversarial game between the fused image and the visible image.

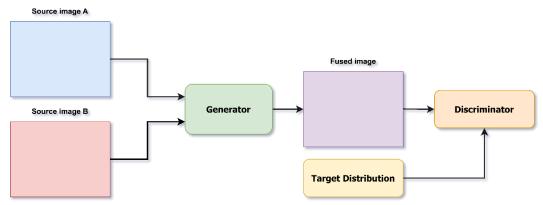


Fig. 6. Generative adversarial network (GAN)-based methods

For Advanced task-driven image fusion, one of the most famous methods is TarDAL (Target-aware Dual Adversarial Learning [14]. In general, typical deep image fusion methods work on learning common features in two modalities that differ in appearance. Infrared imaging highlights the unique structure of the target, while visible light provides textural details of the background. However, the fusion network in the TarDAL approach learns the commonalities between the two imaging modalities while taking into account the differences between them that reflect the complementary features of the two imaging modalities. The fusion network with one generator and two discriminators seeks the commonalities while learning from the differences, thus preserving the structural information of the IR target and the texture details of the visible light, as shown in fig. 7.

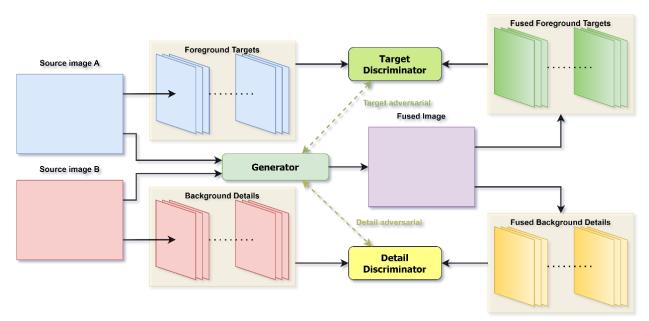


Figure 7. Advanced task-driven image fusion

To generalise, Image fusion usually consists of two main steps, usually the first one is spatial image matching (compensating for spatial distortions such as scale, rotation, displacement, etc.):

• Scale Compensation: Considering that the images may have different scales, the images need to be scaled or zoomed in order to make their scales match.

- Rotation Correction: Images may have rotations due to different shooting angles. In this step, the system may correct the rotation between specific features in the image by detecting them and correcting them.
- Shift Adjustment: Images may be shifted horizontally and vertically due to different camera positions. This step may be used to adjust the position of the images so that they are spatially aligned.
- Feature Extraction, Matching and Fusion.
- Feature Extraction: Extract key features such as corners, edges, etc. from spatially corrected images.
- Feature Matching: Establish the correspondence between images to ensure the matching of the same feature points in different images.
- Fusion: Based on feature matching, appropriate image fusion techniques are used, some of the
 common ones include average fusion, pixel-weighted fusion, multi-resolution fusion etc. These
 techniques determine the value of each pixel in the final image based on a specific algorithm to
 ensure that the fused image looks natural and seamless.

Specific application methods and analysis. In the previous sections the details of the various methods have been elaborated and this section will show the practical results of some of the algorithms and analyse them. The results of the algorithms processing the same image are shown in fig. 8.

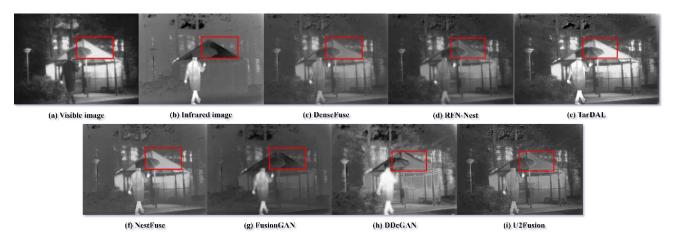


Figure 8. The experimental results on "umbrella" images

Analysing the algorithm structure, the DenseFuse method may be simpler and more effective. However, the relative simplicity of the algorithm leads to the fact that the training of the method only considers the encoder and decoder, and some intermediate information may be lost due to the use of a single layer of feature maps for fusion. Better fusion can be achieved by modifying the loss function, modifying the encoder structure and modifying the fusion strategy. Regarding the Net-Fuse algorithm, it is not effective in multi-scale feature representation. The Fusion Gan method avoids the need to manually design the fusion strategy. In the DDcGAN method, due to its unique algorithmic structure, it can lead to the fused image resembling only one source image and losing the information of the other source image. We were able to find that the fusion of the existing methods is not balanced because the infrared image also contains detail information and the visible image also contains contrast information.

In order to provide some references for future image fusion research, this paper analyses some mainstream algorithms. Regarding the autoencoder (AE)-based approach, this image fusion algorithm has a simpler structure and has the potential to improve the encoder structure, fusion strategy and loss function. Moreover, in real scenarios, when we acquire source images, images acquired from multimodal images and digital photography cannot be aligned due to the presence of parallax and scale differences. Therefore, non-aligned fusion algorithms need to be developed to help achieve accurate image alignment and fusion. As for Generative Adversarial Network (GAN)-based methods, existing fusion strategies lead to imbalances in usage and methods, such as loss of source image information

and inability to separate details of infrared and visible images, which also need to be improved accordingly. The development of advanced task-driven image fusion related techniques can help to design good fusion and detection networks, which can also provide strong support for simultaneous imaging systems with visible-IR sensors.

References

- 1. Ma J., Ma Y., Li C. Infrared and visible image fusion methods and applications: A survey // Inf. Fusion 45. 2019. Pp. 153–178.
- 2. Xu H., Ma J., Jiang J., Guo X., Ling H. U2fusion: A unified unsupervised image fusion network // IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell. 2020. DOI: 10.1109/TPAMI.2020.3012548.
- 3. Mo Y., Kang X., Duan P., Sun B., Li S. Attribute filter based infrared and visible image fusion // Inf. Fusion 75. 2021. Pp. 41–54.
- 4. Liu Y., Chen X., Peng H. et al. Multi-focus image fusion with a deep convolutional neural network // Information Fusion. −2017. − №. 36. − Pp. 191–207.
- 5. Prabhakar K.R., Srikar V.S., Babu R.V. Deepfuse: A deep unsupervised approach for exposure fusion with extreme exposure image pairs // ICCV. –2017. Pp. 4724–4732.
- 6. Li H., Wu X.J. Densefuse: A fusion approach to infrared and visible images // IEEE Transactions on Image Processing. −2018. №. 285. Pp. 2614–2623
- 7. Ma J., Yu W., Liang P. et al. Fusiongan: A generative adversarial network for infrared and visible image fusion // Information Fusion. 2019. №. 48. Pp. 11–26.
- 8. Li H., Wu X.-J., Durrani T. Nestfuse: An infrared and visible image fusion architecture based on nest connection and spatial/channel attention models // IEEE Trans. Instrum. Meas. − 2020. − №. 69. − Pp. 9645–9656.
- 9. Ram Prabhakar K., Sai Srikar V., Venkatesh Babu R. DeepFuse: A deep unsupervised approach for exposure fusion with extreme exposure image pairs // Proceedings of the IEEE International Conference on Computer Vision. –2017. Pp. 4714–4722.
- 10. Zhang H., Xu H., Xiao Y., Guo X., Ma J. Rethinking the image fusion: A fast unified image fusion network based on proportional maintenance of gradient and intensity // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. –2020. Pp. 12797–12804.
- 11. Wang K., Zheng M., Wei H., Qi G., Li Y. Multi-modality medical image fusion using convolutional neural network and contrast pyramid // Sensors 20. 2020. P. 2169.
- 12. Ma J., Yu W., Liang P., Li C., Jiang J. FusionGAN: A generative adversarial network for infrared and visible image fusion // Inf. Fusion 48. 2019. Pp. 11–26.
- 13. J. Ma, H. Xu, J. Jiang, X. Mei, X.-P. Zhang, DDcGAN: A dual-discriminator conditional generative adversarial network for multi-resolution image fusion // IEEE Trans. Image Process. 29. 2020. Pp. 4980–4995.
- 14. Liu J., Fan X., Huang Z., Wu G., Liu R., Zhong W., Luo Z. Target-aware dual adversarial learning and a multi-scenario multi-modality benchmark to fuse infrared and visible for object detection // Proceedings of the IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition pp. 2022. Pp. 5802–5811.
- 15. Zhang X., Ye P., Leung H., Gong K., Xiao G. Object fusion tracking based onvisible and infrared images: A comprehensive review // Inf. Fusion 63. 2020. Pp. 166–187.

УДК 528.8.04

РАЗРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОСЕТЕЙ

Кравцов П.А. 1 (аспирант), Емельянова М.А. 1 (студент), Рыжова В.А. 1 Научный руководитель — доцент, к.т.н Рыжова В.А. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: platonex@bk.ru

В работе рассмотрены вопросы разработки и проектирования гиперспектральных комплексов с автоматической системой обработки и анализа данных с применением нейросетей и метода фотограмметрии. Представлены результаты создания алгоритмов обнаружения зон интереса и построения карт высот. Предложено использовать геопривязку зарегистрированных гиперспектральных изображений для повышения точности формирования фотограмметрической модели и определения пространственных координат объекта поиска.

Ключевые слова

Гиперспектральный анализ, гиперкуб, дистанционное зондирование, фотограмметрия, сверточная нейросеть.

Развитие технологий гиперспектрального анализа привело к расширению областей применения компактных устройств на основе этих технологий. На сегодняшний день малогабаритные камеры, способные получать данные об объекте в различных спектральных диапазонах, широко применяются в таких областях, как геологоразведка, аграрная промышленность, картография, геодезия. Съёмка исследуемой местности может вестись как с использованием космического зондирования, так и с беспилотных или пилотируемых летательных аппаратов с относительно небольшой высоты.

Основной целью гиперспектрального зондирования является поиск зоны интереса, в зависимости от области применения системы. Так, например, при зондировании аграрных полей, зоной интереса могут являться засушливые области ячменного поля или участки, заражённые насекомыми. Как правило, работа устройства ведётся с большим количеством данных.

Например, при космическом гиперспектральном зондировании один снимок представляет собой куб из сотни спектральных каналов, для обработки, сшивки и интерпретации которых предъявляются высокие системные требования к аппаратной части, а передача таких данных в необработанном виде в наземные станции сильно повышает требования к каналам связи [1]. При съёмке с небольших высот, например для решения задач аграрной промышленности, также наличие большого количества снимков, даже при малом количестве спектральных каналов, может приводить к техническим сложностям при обработке данных для поиска зоны интереса [2].

Для передачи большого объёма гиперспектральных данных на наземные станции используются каналы связи, к которым предъявляются высокие требования по пропускной способности и по быстродействию, а для систем обработки, сшивки в гиперспектральный куб и интерпретации данных на борту носителя предъявляются высокие системные требования.

В связи с этим, важным аспектом развития гиперспектральных технологий в настоящее время является разработка автоматических процессов съёмки и обработки данных для повышения точности обнаружения зоны интереса и уменьшения объёма данных и оптимизации выборки для дальнейшего анализа.

На сегодняшний день существующие гиперспектральные камеры и системы имеют ряд серьёзных недостатков, таких как высокая погрешность измерения координат объекта и дополнительные затраты временных ресурсов при подстройке существующих универсальных

программных пакетов к системе или прибору. При этом наличие нейросетей в современных программах полностью не решает вопрос полной автоматизации и поиска зоны интереса без участия человека. Поэтому важным аспектом развитие методов, способствующих повышению эффективности и точности обнаружения объектов контроля и автоматизации обработки первичных данных, является оптимизация алгоритмов полностью автоматической работы программно-аппаратных комплексов.

Алгоритм обработки гиперспектральных данных

Процесс оперативной обработки гиперспектральных данных в режиме бортовой обработки производится в автономном режиме с БПЛА или пилотируемого аппарата. Весь процесс содержит три основных этапа: сканирование и предобработка, постобработка, анализ (рис. 1).

В процессе сканирования производится непрерывная съёмка местности, при этом все последующие кадры выполняются со смещением относительно предыдущих, не менее чем на 60% кадра. Это необходимо для последующего создания цифровых моделей рельефа местности на основании полученных результатов с использованием аналитических приемов фотограмметрии. Также в процессе сканирования производится геолокация для последующего присвоения картам или отдельным кадрам геометки.

Наличие в системе обработки данных нейросети с предустановкой на поиск зоны интереса позволяет произвести отсев кадров в автоматическом режиме.

Постобработка данных представляет собой два параллельных процесса, один из которых – сшивка отдельных кадров в гиперкуб, а другой – построение карты высот на основании фотограмметрии (построение карты высот может производиться как с использованием одноканальной системы сканирования, посредством вычисления на основе сдвига кадров с зоной перекрытия не меньше 60%, так и на основе кадров, полученных на выходе двухканального комплекса при съёмке.

Процесс постобработки завершается автоматическим наложением гиперспектральных данных на карту высот и созданием карты зон интереса. При этом процесс поиска зоны интереса выполняется нейросетью по определенным признакам.

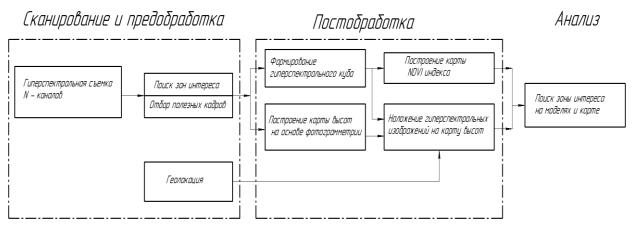


Рис. 1. Алгоритм обработки гиперспектральных данных

Таким образом, рассмотренный алгоритм является основой для обработки гиперспектральных данных с использованием современных технологий анализа изображений, например, таких как глубокое обучение и сверточные нейронные сети. Использование указанных технологий позволяет достичь более высокой достоверности и точности анализа полученных данных, а также решить задачи по обработке большого объема гиперспектральных данных и выявлению характерных признаков объекта для обнаружения зон интереса.

Признаки обнаружения зоны интереса для обучения нейросети

Признаки поиска зоны интереса для обучения нейросети зависят от области применения систем гиперспектрального анализа. Важным параметром являются спектральные характеристики отражения объектов интереса и возможных окружающих сред и/или предметов.

Данные для обучения нейросети рассмотрим на примере исследования объектов аграрной промышленности.

Для определения здоровья растений или целых культур на больших участках территорий агросистем существует показатель, который называется нормализованный вегетационный индекс (NDVI — Normalized difference vegetation index). Это числовой показатель качества и количества определенной культуры на участке поля, который рассчитывается по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{R_{nir} - R_{red}}{R_{nir} + R_{red}},\tag{1}$$

где R_{nir} — усреднённое значение коэффициента отражения в инфракрасной области спектра, R_{red} — усреднённое значение отражения в красной области спектра.

Согласно методике расчёта NDVI, за основу берутся характеристики спектрального коэффициента отражения культур в красной области спектра (0,6-0,7) мкм) и в инфракрасном диапазоне длин волн (0,7-1,0) мкм).

В красной области спектра преобладает поглощение излучения растениями, а в инфракрасной области спектра — отражение. Отношение этих значений позволяет чётко отделить растения от других объектов на снимке и визуализировать распределения показателей NDVI на графиках.

На рисунке 2 показан пример спектральных характеристик поглощения основных пигментов, содержащихся в растениях, значения графика базируются на принципе расчёта *NDVI*. В данном примере показаны максимальные показатели поглощения хлорофиллов и каротиноидов.

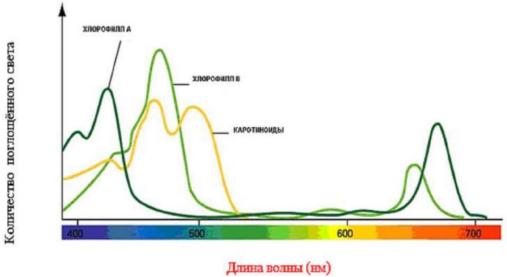


Рис. 2. Полосы поглощения хлорофилла и каротиноидов растениями [3]

Наличие пигмента хлорофилла в растениях позволяет качественно оценить состояние растения, так как этот пигмент отражает волны в диапазоне 447–520 нм, применив значение спектров отражения используя формулу (1), вычисляется значение NDVI. Нормальному процессу развития растения соответствует значение NDVI в пределах от 0,3 до 0,5.

Так, обнаружение на гиперспектральных изображениях областей с индексом NDVI = 0.38 показывает, что растение на данном участке поля нормально растёт и развивается.

Наличие на данных участках углеводородов свидетельствует о присутствии пигмента каротиноида, который имеет область поглощения в сине-фиолетовом спектре от 400 до 500 нм и высокий коэффициент отражения в красно-оранжевой и жёлтой области спектра.

Для иллюстрации отражательных свойств объектов различного происхождения в таблице представлены данные, позволяющие соотнести между собой коэффициенты отражения и индексы NDVI некоторых природных и искусственных объектов сканирования.

Таблица

Распределение значений NDVI для различных объектов

Тип объекта	Отражение в красной области спектра	Отражение в инфракрасной области спектра	Значение NDVI
Густая растительность	0.1	0.5	0.7
Разряженная растительность	0.1	0.3	0.5
Открытая почва	0.25	0.3	0.025
Облака	0.25	0.25	0
Снег и лед	0.375	0.35	-0.05
Вода	0.02	0.01	-0.25
Искусственные материалы (бетон, асфальт)	0.3	0.1	-0.5

Таким образом, анализ гиперспектральных снимков различных участков исследуемой поверхности, позволяет сделать выводы о наличии тех или иных объектов или состоянии растений. Также на основе расчета показателей NDVI создать их пространственное распределение не только для исследуемых агросистем, но также и для сопутствующих объектов, не связанных с растительностью, которые могут представлять интерес при съемке. Данные, полученные при тестовом сканировании, используются в дальнейшем для обучения нейросети.

Результаты исследования гиперспектральных систем показали, что в связи с большим потоком гиперспектральных данных и высокими требованиями к аппаратной части комплексный анализ данных для мониторинга областей интереса в режиме реального времени на базе малогабаритных БПЛА не представляется возможным.

Несмотря на то, что каждая область исследования накладывает специфические требования на аппаратную часть системы, а именно: на количество каналов, структуру оптической схемы, наличие разнесённых объективов для фотограмметрии, алгоритмы поиска зоны интереса и обработки данных могут быть схожи.

Алгоритм обработки гиперспектральных данных, включающий в себя этапы сканирования и предобработки, постобработки и анализа, является основополагающим для обучения нейросети с заданной зоной интереса. Анализ полученных данных производится посредством изучения спектральных сигнатур, представляющих зависимость интенсивности света от длины волны оптического излучения.

Список использованных источников

- 1. Рыбников П.А., Бузина Д.А. Использование мультиспектральных и гиперспектральных данных авиационных и космических аппаратов для изучения горнопромышленных территорий // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2021. №. 11-1. С. 55–70. DOI: 10.25018/0236_1493_2021_111_0_55.
- 2. Dao P.D., Liu J., He Y., Shang J. Recent Advances of Hyperspectral Imaging Technology and Applications in Agriculture. 2020. DOI:10.3390/rs12162659.
- 3. Кравцов П.А., Емельянова М.А., Рыжова В.А. Разработка гиперспектральных аналитических систем с применением нейросетей // Всероссийская конференция «Молодые профессионалы». Спб.: Университет ИТМО. 2024. С. 75–78.

УДК 681.7.068

ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ МОДУЛЯТОРАХ СВЕТА

Сурин Д.А.¹ (студент), **Чистяков В.В.**¹ Научный руководитель – к.ф.-м.н. Наседкин Б.А.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: dmitry.surin9@yandex.ru

Квантовое распределение ключей — это современный метод защиты информации и защищённой коммуникации. Теоретически он гарантирует безусловную безопасность, однако неидеальность компонентов, используемых в системах квантового распределения ключей, приводит к наличию уязвимостей. Один из таких компонентов — электрооптический модулятор выполнен на основе кристалла ниобата лития, в котором возможен фоторефрактивный эффект. В работе проведено исследование влияния фоторефрактивного эффекта на работу фазовых модуляторов света.

Ключевые слова

Квантовое распределение ключей, квантовый взлом, фоторефрактивный эффект, фазовый модулятор, ниобат лития.

Защита информации играет важную роль в современном мире. Развитие криптографии и физики привело к появлению квантового распределения ключей (КРК) — метода безопасной коммуникации, который основан на фундаментальных принципах квантовой физики. КРК позволяет двум удаленным пользователям — отправителю (Алиса) и получателю (Боб) сформировать ключевую последовательность (случайной последовательностью битов, которая используется для шифрования сообщений) таким образом, чтобы его невозможно было получить третьим лицам. Теоретически квантовое распределение ключей обеспечивает безусловную безопасность, то есть защиту от взлома независимо от возможностей злоумышленника (Ева).

На практике при производстве систем КРК используются неидеальные компоненты, из-за чего возникают уязвимости, которые могут быть использованы злоумышленником. Существует множество атак на техническую реализацию: атака с ослеплением детектора, атака с повреждением компонентов с помощью лазера, «Троянский конь» и другие [1]. Необходимо исследовать уязвимости и разрабатывать меры противодействия атакам, чтобы повысить безопасность систем КРК.

Волоконные электрооптические модуляторы света — это устройства, используемые для модуляции интенсивности, фазы и поляризации. Они широко применяются в системах квантового распределения ключей. Фазовые и амплитудные модуляторы производятся на основе нелинейного электрооптического кристалла ниобата лития [2].

В ниобате лития возможен фоторефрактивный эффект (ФРЭ), также известный в литературе как эффект фоторефракции, наведённая оптическая неоднородность, оптическое искажение, фотоиндуцированное изменение показателя преломления. Это локальное обратимое изменение показателя преломления под действием лазерного излучения, наблюдаемое во многих материалах, обладающих спонтанной поляризацией (сегнетоэлектриках). Эффект возникает при низких интенсивностях излучения (порядка 10 мВт/см²).

В последнее время появилось несколько работ, в которых рассмотрено влияние эффекта фоторефракции на системы КРК [3–5]. Было показано, что Ева может активно изменять параметры системы КРК за счёт ФРЭ и благодаря этому перехватить ключ, оставшись незамеченной. На примере переменного оптического аттенюатора показано, что для

осуществления такой атаки (названной «Induced-photorefractive attack») достаточно мощности излучения 3 нВт. Аналогичным образом удалось внести ошибки в работу модулятора интенсивности на основе интерферометра Маха-Цендера.

Целью данной работы является исследовать образцы электрооптических фазовых модуляторов и получить экспериментальные зависимости мощности излучения на центральной и боковых частотах при разной мощности излучения, вызывающего эффект фоторефракции.

Объектами исследования являются фазовые модуляторы, приведенные в таблице.

Таблица

Исследуемые фазовые модуляторы

Образец	Диапазон длин волн	Вносимые потери	Частота модуляции
Модулятор 1	1530 нм – 1565 нм	До 3,5 дБ	До 10 ГГц
Модулятор 2	1530 нм – 1625 нм	До 3 дБ	До 10 ГГц
Модулятор 3	$1500 \; \mathrm{HM} - 1600 \; \mathrm{HM}$	4 дБ	До 10 ГГц

Схема экспериментальной установки приведена на рисунке 1.

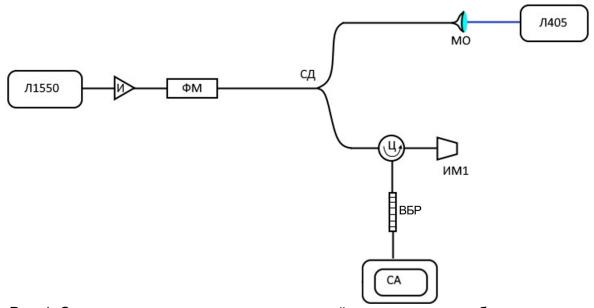


Рис. 1. Схема измерения мощности центральной частоты и спектра боковых частот

В схеме последовательно подключаются источник лазерного излучения (Л1550), изолятор (И), фазовый модулятор (ФМ) и светоделитель (СД). Светоделитель подбирается таким образом, чтобы коэффициент деления приводил к направлению достаточной мощности излучения с длиной 405 нм на фазовый модулятор. К одному из плеч светоделителя подключается циркулятор (Ц) и волоконная брэгговская решётка (ВБР), за которой устанавливается спектроанализатор (СА), ко второму порту циркулятора подключается измеритель мощности (ИМ1). Таким образом, СА регистрирует спектр излучения, перешедшего на боковые частоты, а ИМ1 регистрирует мощность центральной частоты. Ко второму плечу светоделителя подключается микрообъектив (МО), расположенный на трёхкоординатной подвижке. При помощи микрообъектива в оптическое волокно вводится излучение лазера с центральной длиной волны 405 нм (Л405). К фазовому модулятору (ФМ) подключается источник с частотой порядка 10 ГГц.

Мощность лазера Л405 регулируется с помощью источника тока и различных аттенюаторов. Фазовый модулятор освещается в течение пяти минут, после чего регистрируются мощность на ИМ1 и спектр на СА. По результатам замеров строятся диаграммы мощностей на центральной ω и боковых $\omega \pm \Omega$ частотах для разных параметров интенсивности зондирующего излучения с длиной волны 405 нм.

Результаты эксперимента для разных фазовых модуляторов представлены на рисунках 2-4.

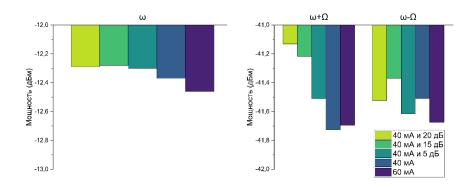


Рис. 2. Мощность центральной и боковых частот для фазового модулятора 1

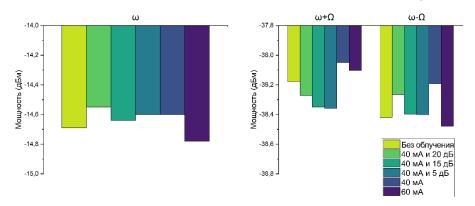


Рис. 3. Мощность центральной и боковых частот для фазового модулятора 2

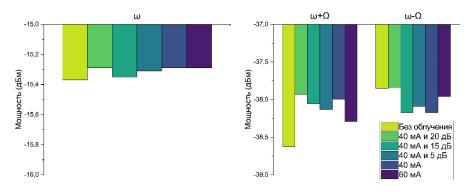


Рис. 4. Мощность центральной и боковых частот для фазового модулятора 3

Для рассмотренных модуляторов изменение интенсивности излучения на центральной и боковых частотах после облучения зондирующим излучением находится в пределах 1 дБм. Дальнейшее развитие исследования включает анализ влияния изменений, вызванных фоторефрактивным эффектом на работу систем КРК.

Список использованных источников

- 1. Xu F. et al. Secure quantum key distribution with realistic devices // Reviews of modern physics. $-2020. V. 92. N_{\odot}. 2. P. 025002.$
- 2. Li M. et al. Lithium niobate photonic-crystal electro-optic modulator // Nature Communications. 2020. V. 11. №. 1. P. 4123.
- 3. Han L. et al. Effect of light injection on the security of practical quantum key distribution // Physical Review Applied. − 2023. − V. 20. − №. 4. − P. 044013.
- 4. Ye P. et al. Induced-photorefraction attack against quantum key distribution // Physical Review Applied. 2023. V. 19. №. 5. P. 054052.
- 5. Lu F. Y. et al. Hacking measurement-device-independent quantum key distribution // Optica. $-2023. V. 10. N_{\odot}. 4. Pp. 520-527.$

Альманах научных работ мол	подых ученых Университета ИТМО. Том 1.
Леятельность образовательного пет	тра "Энергоэффективные инженерные системы"

Деятельность образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы"

УДК 621.311.22

ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ

Аабдани Хуссам ¹ (студент) Научный руководитель – доцент, к.т.н. Кожухов Ю.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: houssamaabdani1997@gmail.com

В статье рассматриваются протонообменные мембраны, которые играют ключевую роль в технологии водородной энергетики, обеспечивая эффективный перенос протонов и предотвращая смешивание водородного и кислородного газов. Эти мембраны используются в электролизе воды для производства водорода и в топливных элементах для преобразования водорода в электричество. Они позволяют эффективно разделять воду на водород и кислород, улучшая энергетическую производительность системы. Благодаря протонообменным мембранам, водородная энергетика становится более устойчивой, чистой и перспективной альтернативой для снижения выбросов углерода и решения проблемы климатических изменений.

Ключевые слова

Протонообменная мембрана, декарбонизация, водородная энергетика, электролиз, энергетический переход, PEMFC.

В постоянно меняющемся ландшафте энергетических технологий топливные элементы с протоннообменной мембраной (PEMFC) стали многообещающим и экологически устойчивым решением. Настоятельная необходимость перехода к более чистым и эффективным источникам энергии привела к активизации исследований технологий топливных элементов. Это введение раскрывает ключевую роль, которую играют PEMFC в расширении границ возобновляемой энергетики, и их потенциал для изменения глобальной энергетической парадигмы [1].

Топливные элементы, в частности PEMFC, находятся на переднем крае инноваций, предлагая универсальную и экологически чистую платформу для преобразования энергии. В отличие от традиционных методов выработки электроэнергии на основе сжигания, PEMFC работают с помощью электрохимического процесса, преобразуя химическую энергию непосредственно в электрическую. Эта уникальная характеристика не только повышает эффективность, но и сводит к минимуму воздействие на окружающую среду за счет сокращения выбросов парниковых газов и зависимости от ископаемого топлива [1].

Значение PEMFC выходит за рамки простого производства энергии; они являются ключом к решению насущных глобальных проблем, начиная от смягчения последствий изменения климата и заканчивая обеспечением энергетической безопасности. Интеграция PEMFC в различные секторы, включая транспорт, стационарное производство электроэнергии и портативную электронику, подчеркивает их преобразующий потенциал. Поскольку страны сталкиваются с необходимостью достижения амбициозных целей в области устойчивого развития, понимание и продвижение технологии PEMFC приобретает первостепенное значение [1].

Это введение подготавливает почву для изучения многогранных аспектов PEMFC, раскрывая их сложную структуру, функционирование и разнообразные области применения. Всесторонне изучая текущее состояние исследований PEMFC, мы стремимся внести свой вклад в коллективные знания, которые продвигают эти топливные элементы из области теоретических перспектив к практическим масштабируемым решениям для устойчивого будущего [1].

Топливные элементы PEM (PEMFCs) — это низкотемпературные топливные элементы, в которых в качестве электролита используется твердый полимер, что устраняет необходимость в агрессивных жидкостях. Водород подается в качестве топлива на сторону анода, а окислитель, обычно воздух, - на сторону катода (рис. 1) [2].

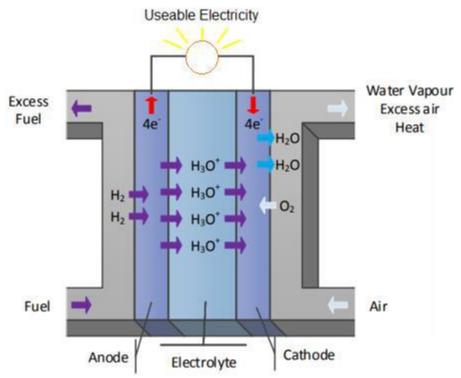


Рис. 1. Основной принцип работы PEMFC

Электролит предотвращает прямую реакцию между топливом и окислителем, но позволяет ионам проходить через него. Соответственно, на стороне анода водород ионизируется с образованием протонов (H+), которые могут проникать через электролит, тогда как на катоде кислород восстанавливается и образует воду с протонами (H+), которые транспортируются через протонпроводящую мембрану. Подреакции и общая реакция могут быть выражены следующими уравнениями [2]:

Анодная реакция:

$$H_2 \rightarrow 2H^+ + 2e^-$$
.

Катодная реакция:

$$\frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2O.$$

Общая реакция:

$$\frac{1}{2}O_2 + H_2 \to H_2O.$$

РЕМГС имеют умеренные рабочие температуры (от 40 до 90°С) и давление 15–30 фунтов на квадратный дюйм (от 1 до 2 бар). Каждый элемент может генерировать 0,3–0,4 вольт постоянного тока [2].

Исследования и разработки, посвященные топливным элементам с протонообменной мембраной (PEMFC), продиктованы рядом комплексных задач, направленных на повышение эффективности, надежности и применимости этой передовой технологии [3]:

- 1. Повышение эффективности: одной из основных задач является постоянное повышение общей эффективности PEMFC. Это включает оптимизацию электрохимических процессов, происходящих внутри элемента, минимизацию потерь энергии и повышение эффективности преобразования химической энергии в электрическую. Исследователи стремятся усовершенствовать термодинамические и кинетические аспекты PEMFC, чтобы повысить их производительность в различных условиях эксплуатации [3].
- 2. Инновации в материалах: поиск более эффективных и экономичных материалов является ключевым направлением. Исследователи стремятся идентифицировать и разрабатывать передовые материалы для ключевых компонентов, таких как

протонообменная мембрана, катализаторы и биполярные пластины. Инновации в области материаловедения способствуют не только повышению производительности, но и долговечности и стабильности PEMFC [3].

- 3. Снижение затрат и масштабируемость: достижение широкой коммерческой жизнеспособности является ключевой целью практического внедрения PEMFC. Исследователи работают над снижением производственных затрат за счет инновационных технологий производства, экономии за счет масштаба и использования более экономичных материалов. Эта задача согласуется с общей целью сделать PEMFC конкурентоспособными по сравнению с традиционными источниками энергии [3].
- 4. Эксплуатационная надежность и долговечность: обеспечение долгосрочной стабильности и надежности PEMFC имеет первостепенное значение. Исследователи стремятся продлить срок службы топливных элементов за счет устранения механизмов деградации, повышения долговечности в изменяющихся условиях и повышения устойчивости к загрязнениям. Эта цель имеет решающее значение для применений, требующих стабильной и надежной выработки электроэнергии [3].
- 5. Диверсификация приложений: универсальность PEMFC расширяет их применимость в различных секторах. Исследователи сосредоточены на расширении спектра применений, от портативной электроники до крупномасштабного производства электроэнергии и транспорта. Адаптация PEMFC к конкретным требованиям различных отраслей промышленности способствует их интеграции в основные энергетические системы [3].

Топливные элементы с протоннообменной мембраной (PEMFC) представляют собой передовую и весьма многообещающую технологию в области топливных элементов. Отличающиеся своей эффективностью, относительно низкими рабочими температурами и пригодностью для различных применений, PEMFC привлекли широкое внимание в поисках чистых и устойчивых энергетических решений [2]:

- 1. Структура: в основе PEMFC лежит его сложная структура, разработанная для облегчения электрохимических реакций, которые преобразуют химическую энергию в электрическую. Ключевые компоненты включают протонообменную мембрану (PEM), анод, катод и биполярные пластины. ПЭМ, обычно изготавливаемый из полимерного электролитического материала, играет ключевую роль в облегчении переноса протонов при одновременном блокировании электронов, обеспечивая генерацию электрического тока [2].
- 2. Функционирование: PEMFC работают посредством электрохимического процесса, включающего окисление водорода на аноде и восстановление кислорода на катоде. Молекулы водорода расщепляются на протоны и электроны на аноде, при этом протоны перемещаются через PEM к катоду, а электроны создают внешнюю электрическую цепь. На катоде протоны соединяются с электронами и кислородом, образуя воду в качестве побочного продукта. Результатом этого процесса является непрерывный поток электрической энергии [2].
- 3. Ключевые компоненты:
 - протонообменная мембрана (PEM): PEM, часто изготавливаемая из полимера перфторсульфоновой кислоты, действует как селективный барьер, позволяющий протонам проходить сквозь нее, блокируя электроны. Она должна сочетать высокую протонную проводимость с механической и химической стабильностью [2];
 - анод и катод: Эти электроды облегчают электрохимические реакции. Анод обычно использует катализатор для расщепления молекул водорода, в то время как катод использует другой катализатор для облегчения восстановления кислорода [2];
 - биполярные пластины: Эти пластины служат каналами для распределения реагентов и продуктов внутри топливного элемента, обеспечивая структурную поддержку и действуя как проводящие поверхности [2].

Как правило, первые три компонента соединяются вместе, образуя мембранноэлектродный узел (MEA), который является сердцем топливного элемента PEM (рис. 2) [2].

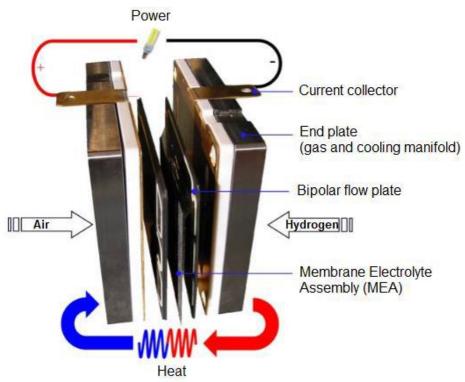


Рис. 2. Структура РЕМГС

Материалы PEMFC:

1. Мембрана.

Мембранные материалы должны быть способны проводить только положительно заряженные ионы и блокировать электроны, и, следовательно, ионная проводимость является наиболее важной характеристикой материала электролита [2].

В дополнение к высокой ионной проводимости мембрана должна быть долговечной, прочной и устойчивой к химическим воздействиям [2].

Выбор мембранных материалов зависит от диапазона температур, при которых работают топливные элементы, поэтому мембрана должна иметь широкий диапазон рабочих температур от -30° C до 200° C [2].

Наиболее широко используемой мембраной является "НАФИОН" (запатентованный продукт DuPont), сульфированный полимер, содержащий PFTE (тефлон). Сульфированные полимеры состоят из перфторированных каркасов и сульфированных боковых цепей. Перфтороэфир отвечает за химическую стабильность, в то время как функция сульфированных боковых цепей заключается в агрегировании и облегчении гидратации [2].

Основные проблемы, связанные с использованием перфторированной мембраны, можно резюмировать следующим образом:

- сложный и экологически чистый производственный процесс включает в себя токсичные промежуточные продукты и отходы производства;
- очень дорогостоящие материалы (~400 долларов США/м²);
- зависимость протонной проводимости от содержания воды в мембране может привести к использованию оборудования для увлажнения для достижения требуемого уровня влажности;
- неработоспособность при высоких температурах;
- во время эксплуатации может наблюдаться набухание и усадка из-за изменений в поглощении воды во время влажности и термоциклирования;
- химическая деградация может произойти при длительной эксплуатации топливного элемента PEM. Эта деградация связана с образованием перекиси, которая разрушает структуру мембраны загрязняющими ионами переходных металлов, образуя реакционноспособные пероксильные и/или гидроксильные радикалы.

Ее толщина составляет 50–145 мкм. Более тонкая мембрана Nafion обеспечивает лучшую проводимость клеток, но усложняет управление водой. Более толстая мембрана замедляет проводимость. Были предприняты значительные исследовательские усилия для преодоления проблем и разработки более дешевого и менее зависимого от воды мембранного материала [2].

2. Слой электрокатализатора.

Функция слоя электрокатализатора заключается в инициировании диссоциации водорода на стороне анода и в ускорении реакции восстановления кислорода (ORR) на стороне катода. Затем электроны, образующиеся на стороне анода, проходят через внешнюю цепь для выработки тока, в то время как протоны проходят через мембрану к катодной стороне мембраны и соединяются с кислородом и электронами, поступающими из внешней цепи, для получения воды и тепла [2].

В низкотемпературных приложениях, таких как топливные элементы РЕМ, работающие на чистом водороде и воздухе, платина широко используется в качестве катализатора, поскольку это наиболее активный благородный металл. Как правило, слои катализатора на основе платины отлично подходят для топливных элементов со сравнительно чистыми реагентами [2].

Однако основная проблема катализатора на основе платины возникает, когда водородное топливо содержит остаточный монооксид (СО). СО отравляет слой Рt-катализатора, что приводит к постоянному ухудшению характеристик топливного элемента [2].

Уменьшение количества платины в слое электрокатализатора может снизить общую стоимость технологии PEMFC и обеспечить массовое производство. Главным образом, содержание платины можно снизить либо путем легирования ее недорогими металлами, как указывалось ранее, либо путем применения катализаторов типа "ядро-оболочка" [2].

3. Газодиффузионный слой (GDL).

Газодиффузионный слой (GDL) является внешним слоем мембранно-электродного узла (MEA) и расположен между проточными пластинами и слоем катализатора. GDL, который толще слоя катализатора, выполняет множество важных задач в PEMFC:

- обеспечьте механическую поддержку структуры катализатора и мембраны;
- проводите электроны между биполярной пластиной и электродом;
- защитите слой катализатора от коррозии или эрозии, вызванных потоками;
- сбалансируйте удержание воды (для проводимости мембраны) с выделением воды (необходимо, чтобы поры оставались открытыми, чтобы водород и кислород могли проникать диффундирует в электроды);
- равномерно распределите реагент с проточных пластин по слою катализатора.

Чтобы выполнять все вышеперечисленные функции, GDL должен обладать высокой электронной и теплопроводностью, иметь пористую природу, быть толще катализатора и гидрофильным. Наиболее популярными материалами, используемыми в качестве GDL в PEMFC, являются бумага из углеродного волокна и углеродная ткань [2].

4. Биполярные проточные пластины и прокладки.

Проточные пластины, используемые на катодной и анодной сторонах PEMFC, распределяют топливо и окислитель по реакционным участкам, собирают вырабатываемый ток, удаляют продукты реакции и тепло, облегчают подачу воды через элемент и обеспечивают механическую поддержку элементов в блоке PEMFC [2].

Материал и конструкция проточных пластин играют важную роль в производительности PEMFC [2].

Проточные каналы обрабатываются механической обработкой или запрессовываются в графитовые пластины. Графит предпочтителен из-за его высокой электропроводности и низкой стоимости. Это тот же материал, который используется для пластин для измерения расхода газа [2].

Каждая пластина flow field включает в себя змеевидный газовый канал для оптимизации контакта газа с MEA. Согласованная геометрия газового канала обеспечивает стабильность ячейки и управление содержанием воды в продукте. Доступны различные конструкции для поля потока, включая штифты, прямые каналы, змеевидные каналы, интегрированные каналы, каналы с перекрестными выступами и поля потока с биоинспирированием [2].



Рис. 3. Пластины поля потока РЕМ [2]

Биполярные проточные пластины на основе металла (SS или титановые сплавы) обладают рядом преимуществ перед пластинами на основе графита, включая более высокую прочность, меньшую стоимость изготовления и лучшую электропроводность. Основным недостатком проточных пластин на основе металла является склонность к коррозии в среде топливных элементов РЕМ [2].

По краям МЕА необходимо установить прокладки для обеспечения газонепроницаемого уплотнения. Эти прокладки обычно изготавливаются из эластичного полимера [2].

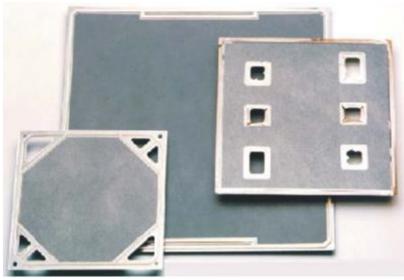


Рис. 4. Мембранные электроды РЕМ в сборе [2]

5. Увлажнители воздуха.

В топливных элементах РЕМ газы-реагенты должны быть увлажнены, поскольку ионная проводимость невозможна без увлажнения [2].

Для достижения максимального водонасыщения газов-реагентов увлажнение должно происходить при рабочей температуре топливного элемента или вблизи нее (в соответствии с температурой охлаждающей жидкости в трубе) [2].

Некоторые батареи топливных элементов оснащены внутренними увлажнителями, в то время как другие имеют внешние увлажнители [2].

5 Факторов, влияющих на производительность водородного топливного элемента

Производительность топливного элемента PEM может быть описана характеристической кривой, которая отображает выходное напряжение в зависимости от плотности электрического тока, называемой кривой as (I-V), как показано на рисунке 5 ниже [2].

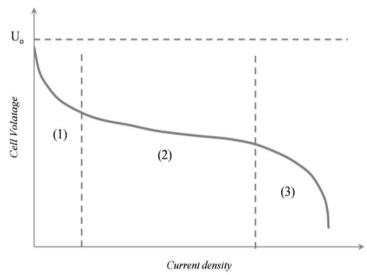


Рис. 5. Типичная I–V кривая для топливного элемента PEM [2]

Идеальная кривая зависимости напряжения от тока представляет собой прямую линию при напряжении 1,23 вольта. Однако это не относится к практичным топливным элементам, которые имеют много типов потерь. Эти потери можно разделить на три основные группы следующим образом:

- 1) потери кинетики, которые обусловлены плохой кинетикой электрода и могут быть улучшены за счет характеристик электрокаталитического слоя;
- 2) омические потери, которые обусловлены омическим сопротивлением компонентов элемента;
- 3) и, наконец, потери при массопереносе, которые возникают из-за того, что вода, образующаяся в результате реакции, блокирует каналы и приводит к ограниченной диффузии газов-реагентов.

Хотя на производительность РЕМГС влияют несколько факторов, мы сосредоточимся на температуре [2] (табл. 1).

Таблица 1

Влияние температуры на параметры [2]				
Параметры	Влияние на параметры	Замечания		
Производительность и результативность	ГС ПОВЫШЕНИЕМ Г			
Влажность	Оптимальная температура поддерживает необходимую влажность	Качество протонообмена мембраны зависит от влажности мембраны. Наличие воды в мембране поддерживает оптимальный уровень влажности. Для увлажнения мембраны требуется достаточное количество воды, а остальная вода должна выходить из топливного элемента для повышения производительности		
Производство электроэнергии	Увеличивается с повышением температуры	Плотность выраоотки электроэнергии повышается на 1.3%		
Напряжение	Увеличивается с повышением температуры	Согласно уравнению Нернста, температура пропорциональна выходному напряжению. Более высокая температура приводит к ускорению кинетики, и, как следствие, напряжение также увеличивается		

Продолжение таблицы 1

Параметры	Влияние на параметры	Замечания	
Ток утечки	Увеличивается с повышением температуры	Мембрана PEMFC считается непроницаемой для водорода и электрически изолированной. Но ток утечки внутри топливного элемента все равно возникает. В литературе по моделированию топливных элементов PEM часто предполагается, что он составляет около 0,01 A/cм ²	
Устойчивость к катализатору	Увеличивается с повышением температуры	Эффективность распада катализатора с течением времени зависит от реакции окисления водорода, реакции восстановления кислорода, высокого потенциала и рН окружающей среды. Платиновый катализатор играет жизненно важную роль в работе топливных элементов. Реакция восстановления кислорода на катоде является медленным реакционным процессом. Чтобы преодолеть медлительность, эффективный катализатор может ускорить скорость реакции с кислородом на катоде, что быстро повысит эффективность РЕМГС	
Массовый кроссовер	Уменьшается с повышением температуры	Если температура повышается, массовый переход падает и возникает риск превышения потенциала концентрации. Плотность тока становится высокой. С другой стороны, перенапряжение активации остается неизменным до 80°С. Затем, приближаясь к 100°С, повышается перенапряжение активации. Считается, что до 80°С эффективность PEMFC остается в хорошем состоянии	
Долговечность	Уменьшается с повышением температуры	Долговечность катализатора, электродной пластины, газодиффузионного слоя, прокладки напрямую связана с долговечностью протонообменной мембраны. Электрохимическая эрозия, эрозия компонентов и термическое воздействие являются ведущими факторами долговечности протонообменной мембраны	

Преимущества и недостатки РЕМГС представлены в таблице 2.

Таблица 2

	Преимущества и недостатки PEMFC					
	Преимущества Преимущества	и не	недостатки РЕМГС Недостатки			
_	имеют высокое напряжение, ток и	_	используется дорогостоящий платиновый			
	плотность мощности;		катализатор;			
_	работают при низком давлении, что обеспечивает безопасность;	_	выдерживает содержание всего нескольких частей на миллион соединений серы;			
_	работают при низких температурах около 40-90°C, что позволяет	_	необходимо увлажнение реагирующего газа, что усложняет систему;			
	использовать недорогие углеродные материалы;	_	катализаторы топливных элементов РЕМ подвержены отравлению СО из-за низкой			
_	быстрый запуск и быстрое		рабочей температуры. Может переносить			
	реагирование;		только около 50 частей на миллион			
_	обладают хорошей устойчивостью к		монооксида углерода. Если в качестве			
	перепадам давления реагирующего		топлива используется риформат из			
	газа;		углеводородов или спиртов, концентрация			
_	компактны и прочны;		СО должна быть снижена до 10 частей на			
_	имеют относительно простую		миллион;			
	механическую конструкцию	_	регулирование содержания воды в			
			мембранном электролите имеет решающее			
			значение для производительности элемента			

Проблемы и направления исследований

Технология топливных элементов PEM сталкивается с серьезными проблемами с точки зрения стоимости, долговечности и производительности [2].

В топливных элементах РЕМ в качестве катализатора используется платина, которая является дорогостоящим компонентом и вносит значительный вклад в общие затраты [2].

Механическая долговечность является важным аспектом производительности источников питания на топливных элементах, особенно при транспортировке. Механическая долговечность топливного элемента может быть повышена за счет проектирования и разработки биполярной пластины с высокой механической прочностью и высокой коррозионной стойкостью. Расходные пластины на основе металлов обеспечивают ряд преимуществ по сравнению с традиционными графитовыми расходными пластинами с точки зрения долговечности. [2] Основным недостатком металлических расходных пластин является то, что они обычно подвержены коррозии в среде топливных элементов РЕМ [2].

В дополнение к коррозии проточной пластины длительная эксплуатация топливного элемента РЕМ приводит к разрушению мембраны. Высокая стоимость и низкий срок службы топливного элемента РЕМ являются основными препятствиями для коммерциализации этой технологии [2].

Понимание материалов, используемых для изготовления ключевых компонентов топливных элементов РЕМ, и их текущего состояния разработки может помочь немедленно решить трудности, связанные с основными проблемами технологии (высокая стоимость и низкий срок службы), что позволит обеспечить глобальную коммерциализацию [2].

Основным применением топливных элементов PEM является транспортировка, хотя они также могут использоваться для стационарных и портативных генераторов электроэнергии и электронных устройств. Благодаря работе при низких температурах, высокой плотности мощности, быстрому запуску, надежности системы и уменьшенным проблемам с герметизацией, коррозией, экранированием или утечками, он также является потенциальным кандидатом для мелкомасштабной локализованной выработки электроэнергии, резервного питания, такого как вышки связи и военная техника, и может быть реализован с системой использования возобновляемых источников энергии для хранения энергии [2].

Топливный элемент PEM может быть изготовлен как отдельный элемент для обеспечения низких требований к энергопотреблению, так и в виде набора элементов с множеством соединенных элементов для получения желаемого напряжения и выходной мощности [2].

- 1. Транспортировка.
- Автомобили: Одно из наиболее заметных применений PEMFCs в автомобильном секторе.
 Электромобили на топливных элементах PEMFCs (FCEVS), предлагающие экологически чистую и эффективную альтернативу традиционным двигателям внутреннего сгорания.
 Быстрое время дозаправки и увеличенный радиус действия делают PEMFC особенно привлекательными для транспортных применений [4];
- Автобусы и грузовые автомобили: помимо личных транспортных средств, PEMFC все чаще изучаются для использования в автобусах и грузовых автомобилях. Расширенный диапазон эксплуатации и снижение воздействия на окружающую среду способствуют широкому внедрению в общественном транспорте и логистике [4].
- 2. Стационарное производство электроэнергии.
- Жилые и коммерческие здания: PEMFC находят применение в стационарном производстве электроэнергии для жилых и коммерческих зданий. Эти топливные элементы могут работать как комбинированные системы теплоснабжения (ТЭЦ), обеспечивая как электроэнергию, так и тепло для целей отопления или охлаждения. Их низкий уровень выбросов и бесшумная работа делают их привлекательными для локального производства электроэнергии [4];
- Системы резервного электроснабжения: PEMFC служат надежными резервными источниками питания, обеспечивая бесперебойную подачу электроэнергии во время перебоев в электросети. Их быстрое время запуска и компактная конструкция делают их

идеальными для критически важных применений, таких как центры обработки данных, больницы и объекты реагирования на чрезвычайные ситуации [4].

- 3. Портативное и дистанционное питание.
- Бытовая электроника: PEMFC используются для питания портативных электронных устройств, обеспечивая более длительный срок службы по сравнению с традиционными батареями. Это приложение особенно актуально для устройств, используемых в отдаленных местах, где частая подзарядка нецелесообразна [4];
- Военное дело и оборона: Портативные источники питания PEMFC и источники питания по требованию делают их подходящими для военных и оборонных применений. Они могут быть интегрированы в портативные блоки питания для солдат в полевых условиях или использоваться для надежного обеспечения энергией удаленных военных объектов [4].
- 4. Морская и аэрокосмическая промышленность.
- Морское применение: PEMFC рассматриваются для морских применений, включая вспомогательную энергетику для судов и, возможно, в качестве основных двигательных установок для небольших судов. Их эффективность и снижение воздействия на окружающую среду соответствуют растущему вниманию к экологичным технологиям в морской отрасли [4];
- Аэрокосмическая промышленность: Легкий вес и высокая плотность энергии делают PEMFC многообещающими кандидатами для применения в аэрокосмической промышленности. Продолжаются исследования по изучению их использования в беспилотных летательных аппаратах (БПЛА), спутниках и других аэрокосмических платформах [4].
- 5. Исследования и разработки.
- РЕМГС играют решающую роль в продвижении исследований и разработок в более широкой области технологий топливных элементов. Исследователи используют РЕМГС в качестве экспериментальных платформ для изучения новых материалов, катализаторов и конструкций систем, способствуя постоянному совершенствованию и инновациям в индустрии топливных элементов [4].

Электролитом, проводящим протоны в топливных элементах такого типа, является так называемый Нафион, и его проводимость очень тесно связана с управлением водой.

Итак, что я на самом деле намереваюсь сделать в своем магистерском исследовании, так это уменьшить потери при активации. С одной стороны, я могу сделать это, обеспечив очень большую площадь поверхности, например, с помощью высокопористых электродов. С другой стороны, как и во многих других типах топливных элементов, используется катализатор, поэтому в данном случае я буду тонко распределять платиноуглеродный катализатор, где углерод будет служить материалом-носителем.

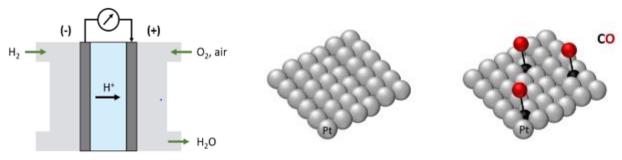


Рис. 6. реакция [5] Рис. 7. отравление угарным газом [5]

Основная проблема, с которой сталкивается этот топливный элемент с платиновым катализатором, заключается в отравлении угарным газом, который способен дезактивировать поверхность платины.

Угарный газ либо содержится в газе, либо образуется внутри элемента, тогда он в большей или меньшей степени задерживается на поверхности платины. Он поглощает и убеждает, уклоняется или дезактивирует катализатор.

Следствием этого является резкое снижение напряжения из-за потерь при активации, что означает, что катализатор не работает должным образом, и это увеличивает первоначальные потери при низких плотностях тока, поскольку потери при активации в основном могут быть устранены с помощью катализатора, и они в основном происходят при низких плотностях тока.

Самое важное в этом катализаторе то, что после того, как он отравлен, его трудно восстановить.

Решение, которое я предлагаю, заключается в том, что его можно остановить в первую очередь и избежать этого отравления, используя предварительную очистку топлива. Таким образом, это в основном связано с водородной стороной, которая должна быть очищена от любого газообразного монооксида углерода, а также от любой серы, потому что сера может оказывать такое же действие до введения в элемент и контакта с поверхностью платины.

Другой альтернативой, которую я предлагаю, является дозирование кислорода в анодную топливную камеру. Итак, если водород содержит примеси монооксида углерода, основанные на этом процессе производства в результате реакции воды и угля, здесь может образоваться некоторое количество монооксида углерода, и его фактически можно окислить до диоксида углерода с использованием кислорода в анодной топливной камере.

Кислород обычно находится на катодной стороне. Таким образом, вводя его со стороны анода, я должен буду всеми средствами предотвратить реакцию кислорода с водородом. В противном случае у меня будет потеря топлива или даже критический отказ топливного элемента.

Требования к электролиту. Итак, что касается Нафиона (электролита, который я буду использовать в своем магистерском исследовании) (рис. 8 [5]), он должен быть хорошим проводником протонов, это означает, что он может способствовать высокой скорости диффузии протонов через электролит; быстрый процесс переноса.

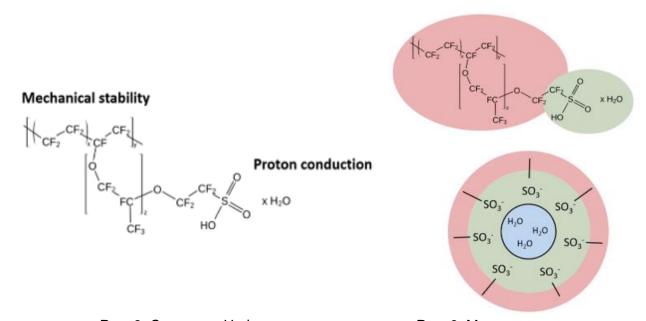


Рис. 8. Структура Нафиона

Рис. 9. Механизм проведения

Я хочу, чтобы электролит, с которым я буду работать, был плохим проводником электронов, потому что, конечно, я хочу электронно изолировать анод от катода, чтобы предотвратить короткие замыкания.

Кроме того, электролит должен обладать химической стабильностью в окислительной и восстановительной средах. Это требует, чтобы электролит был способен выдерживать оба вида атмосфер и оба вида потенциалов, проявляющихся на электродах, и это поможет мне избежать распада, поскольку это один из различных механизмов деградации электродов. На данном этапе очень важно обратить внимание на эту тройную фазовую границу: газовая фаза, катод и электролит находятся в пространственной близости друг к другу (рис. 9).

Также важно отметить, что электролит должен быть связан с газом, чтобы у меня не было перехода топлива от анода к катоду и, таким образом, потери топлива, а также возникновения возможных паразитных реакций, которые снижают топливную экономичность.

В механизме моего электролита есть ответвление, которое придает мне механическую стабильность. Оно просто расширяется все дальше и дальше, вот почему это полимер.

И у меня также есть эта протонная проводимость, которая обеспечивается сульфированной частью.

В этом механизме проводимости я заметил, что у меня есть гидрофобная цепь (элементы, которые отвергают любую близость к воде). Эта часть молекулы не хочет быть окруженной водой, а скорее самой собой.

С другой стороны, у меня также есть гидрофильные кластеры, которые могут поглощать воду. Что на самом деле происходит, если у меня есть несколько таких групп вместе, так это то, что я могу в принципе сформировать внешнюю область, где у меня везде будет только эта длинная полимерная цепочка. В то время как небольшие группы, которые, конечно же, продолжаются, как и в следующем сегменте, все как бы направлены друг к другу, и рядом с ними может быть скопление воды.

Обратите внимание, что электропроводность увеличивается с увеличением содержания воды, поэтому я могу использовать воду, образующуюся на стороне катода, для увлажнения моего электролита. Избыточное количество воды в системе такого типа приведет к потере электропроводности и затоплению моего элемента и электродов. Таким образом, это то, что должно жестко контролироваться.

Таким образом, идеальная ситуация, о которой я думаю, заключается в равномерном увлажнении электролита, чтобы иметь области с одинаковой проводимостью и в то же время следить за тем, чтобы вода не попадала в пористые электроды и не снижала их реактивность, блокируя активные стороны.

Итак, чего я хочу избежать, так это ухудшения диффузии кислорода. Я позволю некоторому количеству воды повторно диффундировать в электролит, создавая определенную влажную атмосферу для моего электролита, чтобы обеспечить оптимальную протонную проводимость, но также я хочу удалить определенную часть воды, чтобы не препятствовать поступлению кислорода в топливный элемент.

Список использованных источников

- 1. Кук Б. Введение в топливные элементы и водородную технологию // Журнал инженерной науки и образования. 2002. №. 11(3). С. 205–213.
- 2. Анудж Бхатия. Введение в топливные элементы. 2021. 87 с.
- 3. Эпплби А.Дж. Технология топливных элементов: состояние и перспективы на будущее // Энергетика. 1993. №. 21(4-8). С. 521—353.
- 4. Теллез-Круз, М.М., Эскориуэла, Дж., Соларза-Фуриа, О. и компания, В. Топливные элементы с протоннообменной мембраной (PEMFC): достижения и проблемы // Полимеры. 2021. №. 13(18). С. 3034.
- 5. Водородные топливные элементы от химии до инженерию. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.udemy.com/course/fuel-cells/learn/lecture/31929862#overview (дата обращения: 20.04.2023).

УДК 696.2

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАЗОПРОВОДА СРЕДНЕГО И НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ ПОСЕЛКЕ

Быханова Т.А.¹ (аспирант) **Научный руководитель** – д.т.н., профессор Цыганков А.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: kolesnikova 12@mail.ru, avtcygankov@itmo.ru

В работе описывается разработка проекта газоснабжения поселка газопроводами среднего и низкого давления. Также описывается внутридомовое газоснабжение многоквартирного жилого дома и газовое оборудование, которое устанавливается, учитывая архитектурно-планировочное решение дома, требования инструкций по эксплуатации. Рассказывается о необходимых решениях при проектировании сети газоснабжения.

Ключевые слова

Газоснабжение, газовое оборудование, проектирование сети газоснабжения, вентиляционная система, концентрация газа в помещении.

Проектирование систем газоснабжения населенных пунктов базируется на схемах перспективных потоков газа, генеральных планах последующей застройки городов, на проектах планировок районов. Вместе с тем, необходимо учитывать наличие препятствий для прокладки газопроводов, например: коммуникации, водные объекты (реки, озера), неровные формы рельефа (овраги, холмы), железнодорожные пути, какие-либо подземные сооружения.

Система газораспределения должна быть безопасной в эксплуатации, надежной, удобной в обслуживании, а также обеспечивать непрерывное снабжение газом потребителей. Кроме того, в проектирование должно быть включено предварительное планирование возможности отключения отдельных сегментов газопровода для проведения ремонтных мероприятий.

Целью работы является проектирование газопроводов среднего и низкого давления в городском поселке, прокладка газопровода внутри дома, установка газового оборудования и предупреждение происшествий, связанных появлением опасных концентраций газа в помещении.

Подземный газопровод низкого давления прокладываем из полиэтилена во избежание коррозии. Надземный газопровод низкого давления сделан из стали, проведен вдоль фасада дома. Для стального газопровода необходимо предусмотреть защиту от коррозии. Антикоррозионная защита представляет собой меры, направленные на предотвращение повреждения металла вследствие воздействия окружающей среды. На всех участках подземного стального газопровода низкого давления предусматриваем антикоррозионную защиту от почвенной коррозии и от коррозии, которая вызывается блуждающими токами посредством покрытия газопровода двумя слоями краски, эмали или лака, которые предназначены для наружных работ — это пассивная защита. Также газопроводы низкого давления до мест врезок попадают в зону электрохимических станций катодной защиты — это активная защита. Таким образом, обе методики направлены на обеспечение длительной службы подземным газопроводам низкого давления и предотвращение потери целостности конструкции.

Диаметры труб подбираются исходя из гидравлического расчета. Также в ходе расчета рассчитываются потери давления в газопроводе.

В помещении, в котором установлено газоиспользующее оборудование, необходимо предусматривать вентиляционный канал. Вентиляция помещений, предназначенных для установки газоиспользующего оборудования, должна быть естественной. Вытяжка

предусматривается из расчета трехкратного воздухообмена в час, а приток - в объеме вытяжки и дополнительного количества воздуха на горение газа. Размеры вытяжных и приточных устройств определяются расчетом [1, п. 5.9]. Приток чистого воздуха в помещение кухни обеспечивается из соседних помещений через зазор в нижней части двери кухни, который, согласно [1, п. 5.1], должен быть не менее 0,02 м², либо установкой жалюзийных решёток в дверях или наружных стенах помещения. Объем помещения кухни должен быть: не менее 8 м³ — если на кухне установлена плита с двумя горелками; не менее 12 м³ — если на кухне установлена плита с четырьмя горелками [1, п. 5.1].

По обособленному дымоходу в атмосферу отводим продукты сгорания от газовых приборов – плиты и водонагревателя. Газовые приборы обычно присоединяют к дымоходам с помощью труб из стали.

Дымоход необходимо прокладывать во внутренних капительных стенах зданий. Если же дымоход проходит через наружную стену, то необходимо обеспечить достаточную толщину стены между дымоходом и внешней стороной, чтобы предотвратить появление конденсата внутри него. Материалом для изготовления дымохода может служить обожженный красный кирпич, а также асбестоцементных или гончарных труб, блоков из несгораемых материалов. Этот подход обеспечивает безопасную и эффективную эксплуатацию дымоходов, а также предотвращает возникновение проблем, связанных с конденсацией пара и пожароопасностью.

Во избежание образования конденсата и последующего образования инея в дымоходах необходимо обеспечить, чтобы температура газов, входящих в дымоход, не значительно снижалась. Рекомендуется проектировать дымоход со стенками увеличенной толщины и утепленными асбестовыми плитами или известково-шлаковой штукатуркой на чердаке и выше крыши. Такие меры предотвратят образование конденсата и обеспечат безопасную и эффективную работу дымохода. Необходимо учитывать эти факторы при проектировании дымохода в жилых домах, чтобы гарантировать комфортные условия проживания и безопасность людей.

На кухне устанавливаются необходимые газовые приборы: плита, водонагреватель, газовый счетчик. Приборы подбираются исходя из нужд и количества людей, проживающих в квартире. При установке приборов важно учитывать необходимые безопасные расстояния между ними.

Для предотвращения взрыва бытового газа в проекте предусмотрена установка датчиков метана в помещении кухни, газовая плита оборудована системой «газ-контроль».

Рассчитаем нижний и верхний пределы воспламенения газа по [2, п. 4.3.1]. Значения пределов воспламеняемости компонентов берем по [3, табл. 1.2].

Состав газа, используемого в проекте, и пределы воспламеняемости его компонентов представлен в таблице.

Компонентный состав газа и их пределы воспламеняемости

Компонент CH_4 C_2H_6 C_3H_8 C_4H_{10} C_5H_{12} CO_2 N_2 80,28 2,59 1,15 0,70 0,71 0,73 13,84 % L_H, % 5,0 3,0 2,0 1,7 1,35 L_B, % 15,0 12,5 9,5 8,5 8,0

Пределы воспламеняемости, %, рассчитываются по формуле:

$$l_{H(B)} = \frac{100}{\frac{r_1}{l_{H(B)1}} + \frac{r_2}{l_{H(B)2}} + \dots + \frac{r_n}{l_{H(B)n}}},$$
(1)

Таблица

где $l_{\rm H(B)}$ — нижний (верхний) предел взрываемости n-го компонента газа, %; r_n — процентное содержание n-го компонента газа в смеси.

По формуле (1):

Нижний предел воспламеняемости:
$$l_{\rm H}=\frac{100}{\frac{80,28}{5,0}+\frac{2,59}{3,0}+\frac{1,15}{2,0}+\frac{0,7}{1,7}+\frac{0,71}{1,35}}=5,43\%.$$

Верхний предел воспламеняемости:
$$l_{\rm B} = \frac{100}{\frac{80,28}{15.0} + \frac{2,59}{12.5} + \frac{1,15}{9.5} + \frac{0,7}{8.5} + \frac{0,71}{8.0}} = 17,09\%.$$

Пределы воспламеняемости с поправкой на балласт находятся по следующей формуле, %:

$$l_{\text{H(B)}}^{6} = l_{\text{H(B)}} \cdot \frac{\left(1 + \frac{\delta}{1 - \delta}\right) \cdot 100}{100 + l_{\text{H(B)}} \cdot \frac{\delta}{1 - \delta}},$$
 (2)

где $l_{H(B)}$ — нижний (верхний) предел взрываемости, %; δ — содержание балластных примесей (CO₂, N₂) в долях от единицы.

Рассчитаем
$$\delta = \frac{0.73 + 13.84}{100} = 0.146$$
.

Нижний предел воспламеняемости по формуле (2): $l_{\rm H}^6 = 5.43 \cdot \frac{\left(1 + \frac{0.146}{1 - 0.146}\right) \cdot 100}{100 + 5.43 \cdot \frac{0.146}{1 - 0.146}} = 6.29\%;$

Верхний предел воспламеняемости по формуле (2):
$$l_{\rm B}^6=17,09\cdot \frac{\left(1+\frac{0,146}{1-0,146}\right)\cdot 100}{100+17,09\frac{0,146}{1-0,146}}=19,44\%.$$

Значит, взрыв газа произойдет при его содержании в помещении от 6,29% до 19,44%.

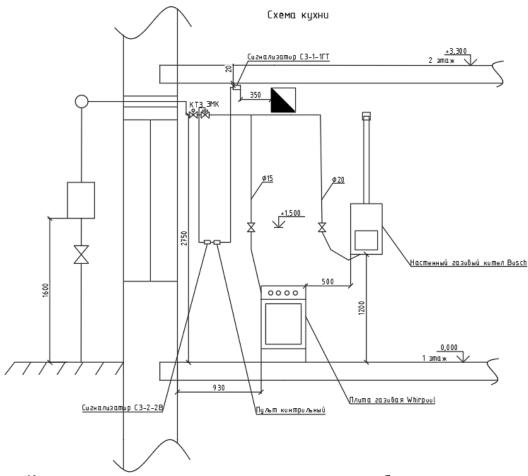


Рисунок. Конструктивное решение по размещению газового оборудования в помещении

В заключение необходимо отметить, что проектирование газопроводной сети – это важная задача, которая требует особого внимания и соблюдения строгих правил, так как газ является источником повышенной опасности. Также газоиспользующее оборудование, располагающееся на кухне, производит газы, которые могут быть опасны для здоровья человека, поэтому важно обеспечить их правильную вентиляцию.

Список использованных источников

- 1. СП 402.1325800.2018. Здания жилые. Правила проектирования систем газопотребления. Введен 06.06.2019. М.: Минстрой России, 2018. 27 с.
- 2. Комина Г.П. Газоснабжение. Горение газов: учеб. пособие / Г.П. Комина, А.Л. Шкаровский Е.Е. Мариненко. Волгоград: ВолгГАСУ, 2010. 124 с.
- 3. Стаскевич Н.Л. Справочник по газоснабжению и использованию газа / Н.Л. Стаскевич Г.Н., Северинец Д.Я., Вигдорчик Д.Я. Л.: Недра, 1990. 762 с.

УДК 621.59

ОЦЕНКА ПОТРЕБНОСТИ В СПГ УДАЛЕННОГО ПОСЕЛЕНИЯ СИБИРИ

Гусева Н.С.¹ (студент) Научный руководитель – д.т.н., профессор Баранов А.Ю.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: nadiaguseva@gmail.com

Сибирь в силу своего сурового климата, а также малонаселенных и труднодоступных территорий, сталкивается с проблемой доставки различных видов топлива. В данной статье на примере поселка Жиганск административного центра Жиганского улуса Якутии, который расположен вблизи крупной реки Лена, рассматривается целесообразность завоза сжиженного природного газа в отдаленные населенные пункты Сибири.

Ключевые слова

Сжиженный природный газ, газовые хранилища, поселок Жиганск, отдаленные поселения Сибири, Северный завоз, Сибирь, газовоз, инновация.

На сегодняшний день населенные пункты Дальневосточного региона РФ имеют достаточно низкий уровень газификации, который по разным оценкам составляет от 19 до 24% [1].

Одной из проблем обеспечения жизнедеятельности отдаленных населенных пунктов являются трудности с доставкой различных видов топлива. На решение этой проблемы направлен комплекс ежегодных государственных мероприятий по обеспечению территорий Крайнего Севера Сибири и Дальнего Востока из Европейской части России основными жизненно важными товарами (прежде всего, продовольствием и нефтепродуктами) в преддверии зимнего сезона. Данный Северный завоз осуществляется преимущественно при помощи водного транспорта [2, 3].

Сложившаяся схема снабжения энергоносителями нерациональна из-за большого плеча доставки топлива с нефтеперерабатывающих заводов. В отличие от традиционных видов топлива, запасы альтернативного энергоносителя – сжиженного природного газа могут быть сформированы в низовьях сибирских рек уже к началу периода судоходства, причем в неограниченных объемах. Во многих дальневосточных регионах России основное транспортное сообщение по причине неразвитой дорожной и железнодорожной инфраструктуры обеспечивает речное судоходство.

Из-за сурового климата региона крупнейшая судоходная река Сибири Лена имеет ограниченный период судоходства продолжительностью всего 120–160 суток, в остальное время многие населенные пункты не имеют возможности получать грузы по воде [4–6].

Несмотря на низкий уровень газоснабжения Дальнего Востока в целом, южная часть Якутии имеет высокий уровень газоснабжения за счет активного использования внутренних источников природного газ.

Однако с северной и восточной частями Якутии дела с газом обстоят не так хорошо. По проекту газификации «Сила Сибири» магистральный газопровод пройдет по территориям трех субъектов РФ: Иркутской области, Республики Саха (Якутия) и Амурской области, но территории, располагающиеся ниже по течению реки Лена, не затронет.

Из-за низкой плотности населения территории Дальнего Востока постройка трубопроводов для организации централизованного газоснабжения крайне нерентабельное решение проблемы доставки энергоносителя.

Сжиженный природный газ является наиболее привлекательным для этого региона видом топлива, он экологичен при сжигании, а его удельная теплота сгорания составляет 50 МДж/кг, что значительно превышает удельную теплоту сгорания угля 28 МДж/кг и дизельного топлива 43 МДж/кг. Важно, что СПГ уже производится в северных районах России и может поставляться потребителям крупных заводов Ямал СПГ и Арктик СПГ-2.

Обеспечивать поставки СПГ потребителям можно речным транспортом. Наиболее перспективным решение представляется логистическая схема, в которой основным топливом является СПГ, который доставляется, например, по реке Лена, а затем хранится и регазифицируется в поселениях в период отсутствия навигации.

Логистическую схему снабжения энергией с использованием СПГ удобно пояснить на конкретном примере, в качестве которого можно рассмотреть поселок Жиганск. Он расположен на левом берегу реки Лена в 610 км ниже по течению от Якутска и население по состоянию на 2021 год составляет 3382 человек.

Оценить потребность населения в газе, можно используя жилищный кодекс РФ, в котором указано что минимальная норма жилой площади на человека составляет $s_{\min{(\text{чел-ка})}}=12~\text{m}^2$, а также приведены нормативы на потребления природного газа (ПГ) из которых следует, что при наличии в жилище газовой плиты, на одного проживающего ежемесячно расходуется $10~\text{m}^3$ ПГ, а при наличии газовой плиты и газового водонагревателя норма расхода ПГ на одного проживающего увеличивается уже $v_{\text{быт}}=23,1~\text{m}^3$. В случае использования газового отопительного котла на 1~кв. м. отапливаемой площади затрачивается – $v_{\text{от}}=7~\text{m}^3$ в месяц.

Ввиду отсутствия подробных данных о распределении жителей по квартирам или домам, можно предположить, что в Жиганске проживают семьи численностью от 2 до 6 человек, которые будут использовать $\Pi\Gamma$ для отопления и приготовления пищи.

Минимальная жилая площадь на семью (1):

$$S_{\min} = N \cdot S_{\min (\Psi \in J - \kappa a)}. \tag{1}$$

Затраты ПГ на бытовые нужды (2):

$$V_{\text{быт}} = N \cdot v_{\text{быт}}.\tag{2}$$

Затраты $\Pi\Gamma$ на отопление (3):

$$V_{\rm ot} = S_{min} \cdot v_{\rm ot}. \tag{3}$$

Общие затраты ПГ на отопление и бытовые нужды (4):

$$V_{\text{CVM}} = V_{\text{6ht}} + V_{\text{0T}} = N \cdot v_{\text{6ht}} + S_{min} \cdot v_{\text{0T}}. \tag{4}$$

Расход газа за месяц (5):

$$V_{\text{cym (Mec.)}} = \sum V_{\text{cym}} \cdot n, \tag{5}$$

где N – численность семьи; n – число семей.

Таблица Характеристика потребления природного газа жителями г. Жиганск

Числен- ность семьи, чел.	Минимальная жилая площадь, м ²	Затраты ПГ на бытовые нужды, м ³	Затраты ПГ на отопление, м ³	Всего, м ³	Число семей	Расход газа в месяц, м ³
2	24	46,2	168	214,2	136	
3	36	69,3	252	321,3	170	
4	48	92,4	336	428,4	150	362 212,2
5	60	115,5	420	535,5	100	
6	72	138,6	504	642,6	250	

Получается на население 3382 человека с предполагаемым количеством и составом проживающих семей на месяц (31 календарный день) будет необходимо минимум 362 212,2 $\,\mathrm{m}^3$ природного газа. С учетом соотношения плотности природного газа в газообразном (0,8 кг/ m^3) и сжиженном состоянии (450 кг/ m^3) и учитывая, что доставка топлива может осуществляться всего 120 дней в году (рассчитываем на наименьший срок с целью снизить риск непредвиденной ситуации), т.е. срок хранения СПГ составит не менее 7,9 мес., для работы системы автономного газоснабжения поселка необходимо установить хранилище с вместимостью минимум 5090 m^3 .

Такой объем размещается в хранилище с внутренним диаметром 13 м и высотой низкотемпературного пространства 40 м. При использовании традиционных изоляционных конструкций суточные потери СПГ в таком хранилище составят не менее 0,11% или 2520 кг в сутки, что при нормальных условиях составит 3150 м³/сутки. Расчетное суточное потребление ПГ составляет 12000 м³/сутки, что в четыре раза превышает объем парообразования в хранилище, т. е. все образовавшиеся в хранилище пары СПГ будут использованы на отопление.

В 2027 году Якутская топливно-энергетическая компания планирует начать первый этап проекта Якутский СПГ, который будет включать в себя строительство СПГ завода на 8,9 млн т/ год СПГ, а также строительство магистрали ПГ протяженностью 1358 км с двумя компрессорными станциями. Будущая магистраль будет проходить через участки Кысыл-Сыр – Амга – Аян в близи города Якутск. Строительство магистрального газопровода позволит создать условия для строительства малого завода по ожижению природного газа для последующего обеспечения им ближайших населенных пунктов.

В данной работе рассмотрена одна из проблем отдаленных населенных пунктов, а именно трудности с доставкой различных видов топлива в отдаленные населенные пункты, расположенные возле крупных рек Сибири. Также на примере поселка Жиганск была рассмотрена логистическая схема снабжения энергией поселков с использованием СПГ и приведен расчет объема и размеров хранилища СПГ, необходимого для комфортного проживание в отопительный сезон.

Выполненный анализ показывает, что после строительства магистрального газопровода, по проекту «Якутский СПГ», ЯТЭК (Якутская топливно-энергетическая компания) также сможет обеспечивать своей продукцией поселения, находящиеся ниже по течению реки Лена и, что существенно повысит качество жизни в данных поселениях и будет способствовать развитию предпринимательства.

Список использованных источников

- 1. Восточный Экономический Форум. Москва, 2020. Дальний Восток новые вызовы и возможности. Повышение отдачи от нефти и газа для россиян.
- 2. Савосин Д. ЯТЭК возобновила добычу газа на Мастахском месторождении впервые с 2015 г. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://neftegaz.ru/news/dobycha/656263-vpervye-s-2015-g-yatek-vozobnovila-dobychu-gaza-na-mastakhskom-mestorozhdenii (дата публикации: 23.12.2020).
- 3. О государственной программе Республики Саха (Якутия) "Обеспечение безопасности жизнедеятельности населения Республики Саха (Якутия) на 2012 2019 годы" : УКАЗ от 12 октября 2011 года N 985 // Указ Главы Республики Саха (Якутия). − 2011. − № 985. − Ст. Раздел 1.
- 4. Мировой рынок СПГ Структурные особенности и прогноз развития [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://magazine.neftegaz.ru/articles/rynok/769892-mirovoy-rynok-spg-strukturnye-osobennosti-i-prognoz-razvitiya/ (дата публикации: 10.02.2023).
- 5. Жилищный кодекс Российской Федерации: текст с изменениями на 1 октября 2023 года. Москва: Эксмо, 2023. 224 с.
- 6. Иванов Л.В., Анохин А.В. Анализ режимов топливной эксплуатации речных транспортных судов, используемых для поставок в северные регионы России // Сборник трудов VII конгресса молодых ученых. 2019. Т.5. С. 13—16.

УДК 621.572

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ПОДГОТОВКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ

Казанцев Р.А.¹ (аспирант) Научный руководитель – доцент, к.т.н. Кожухов Ю.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: karoz.exe@gmail.com, kozhukhov yv@mail.ru

Исследование направлено на анализ перспектив развития систем низкотемпературной сепарации в контексте объектов подготовки углеводородных газов. Основное внимание уделяется повышению эффективности процессов очистки и разделения газовых смесей с использованием современных технологий и методов. Целью работы является оценка перспектив развития объектов подготовки газа с целью увеличения производительности и снижения эксплуатационных затрат. Полученные результаты могут быть использованы для улучшения технологических процессов на объектах нефтегазопереработки.

Ключевые слова

Низкотемпературная сепарация, углеводородные газы, турбодетандерный агрегат, очистка газовых смесей, технологии разделения газов.

Современные технологии добычи и подготовки углеводородных газов требуют эффективных систем сепарации для обеспечения высокой производительности и экономической эффективности. В данной научно-исследовательской работе рассмотрены перспективы развития систем низкотемпературной сепарации на объектах подготовки углеводородных газов.

Процесс низкотемпературной сепарации основан на использовании различных температур кипения, при которых различные компоненты смеси газов или жидкостей конденсируются при разных температурах. Это позволяет разделить попутный нефтяной газ на отдельные компоненты от метана до гексана, включая изомеры C_4 - C_6 [1]. Эти компоненты углеводородной смеси имеют высокую степень чистоты и могут быть использованы в различных процессах, таких как производство пластмасс, удобрений, а также в качестве топлива.

Многие процессы промышленного производства требуют разделения газожидкостных смесей для очистки продуктов или вторичной переработки полезного сырья. Попутный нефтяной газ и природный газ, добываемый из нефтегазовых скважин, имеет разный химический состав, исходя из которого имеет различную степень извлечения процента углеводородов. В свою очередь, добываемое сырьё, насыщенное парами воды, при высоком давлении и при определённой температуре способно образовывать твёрдые соединения с водой - гидраты, которые состоят из одной или нескольких молекул газа (метана, пропана, углекислого газа и др.) и воды [2]. Гидраты в процессе эксплуатации могут закупоривать трубопроводы, образовывая гидратные пробки, влиять на работу запорно-регулирующей арматуры, снижать точность измерения систем контрольно-измерительных приборов, например расходомеров, что влияет на нормальное производство и увеличивает эксплуатационные расходы на оборудование [3]. Поэтому добываемое сырьё должно быть обезвожено перед поступлением на линейную часть трубопровода. Газожидкостное разделение также используется в химической промышленности, на атомных электростанциях с водяными реакторами под давлением, мембранных биореакторах, для удаления пыли, рекуперации отходящих газов гидрирования дизельного топлива и в технологии ферментации.

Объекты подготовки попутного нефтяного газа и природного газа представляют собой комплексные технологические установки, предназначенные для очистки и подготовки газовых потоков перед тем, как они будут отправлены на дальнейшую переработку или транспортировку. Эти объекты включают в себя различные процессы, такие как отделение конденсата, удаление твёрдых частиц и влаги, а также регулирование давления и состава газа. Они могут быть различной масштабности - от небольших установок на месторождениях до крупных заводов на газоперерабатывающих предприятиях. Объекты подготовки попутного нефтяного газа и природного газа обычно состоят из нескольких основных частей, таких как газосепараторы, фильтры, газоочистные установки, компрессоры, регуляторы давления и другие технологические устройства. Они работают в комплексе для обеспечения высокого качества и безопасности подготовленного газа. В настоящее время наблюдается тенденция к применению низкотемпературных процессов на объектах подготовки газа, по сравнению с классическими методами подготовки, имеющие превосходство в следующих аспектах.

Высокая эффективность: низкотемпературная сепарация может обеспечить высокую степень разделения компонентов газовых смесей, что позволяет получать более чистые и концентрированные продукты.

Гибкость и масштабируемость: технологии низкотемпературной сепарации могут быть адаптированы для различных типов газовых потоков и обладают возможностью масштабирования процессов в зависимости от потребностей производства.

Экономическая выгода: низкотемпературная сепарация может привести к уменьшению затрат на производство и повышению экономической эффективности предприятий по подготовке углеводородных газов.

Использование низких температур в процессах сепарации представляет собой перспективное направление развития, которое может принести значительные выгоды как в экономическом, так и в экологическом плане.

В настоящей научно-исследовательской работе были рассмотрены такие технологии сепарации как дистилляция, адсорбция, мембранные процессы, в связи с их наибольшей распространённостью [4]. Каждый из перечисленных методов имеет свои достоинства и недостатки. Выбор зависит от нескольких факторов, в том числе: объёма перерабатываемого газа, требований к чистоте конечного продукта, капитальных и эксплуатационных затрат и многих других параметров.

На основании проведённого анализа была выбрана схема криогенной дистилляции, где основополагающим фактором стала пропускная способность с целью получения максимальной экономической выгоды от реализации проекта. Соответственно мембранный метод в данной работе не подходит, в связи с невозможностью обработки больших объёмов сырья, сохраняя при этом компактность установки. Криогенная адсорбция также обладает высокой пропускной способностью, но при этом требуются большие объёмы адсорбера, который необходимо регенерировать, что увеличивает первоначальные затраты на строительство.

Криогенная дистилляция — это процесс разделения компонентов нефтяного газа на основе различной температуры конденсации и сублимации компонентов при низких температурах, получаемых путём редуцирования и детандирования рабочего вещества. Преимущества криогенной дистилляции попутного нефтяного газа включают высокую эффективность разделения, возможность получения высокочистых фракций и извлечения ценных компонентов, а также способность работы с большими объёмами газовых потоков. Кроме того, этот метод обычно требует меньше энергии по сравнению с традиционными методами разделения, такими как адсорбция или химическая очистка.

Ниже перечислено основное оборудование, используемое в схемах криогенной дистилляции:

- криогенные теплообменники;
- фракционные колонны;
- основное и вспомогательное насосно-компрессорное оборудование;
- ёмкостное оборудование для сбора и хранения жидких фракций.

Редуцирующий орган, отвечающий за основной процесс охлаждения попутного нефтяного газа, также имеет видовое разнообразие, вот несколько из наиболее часто встречающихся [5]:

- трубка Ранка;
- сопло Лаваля;
- дросселирование;
- турбодетандерный цикл.

В связи с неэффективностью трубки Лаваля в турбулентных процессах с реальными газами, что может нивелировать в своём конструктивном исполнении трубка Ранка, был выбран турбодетандерный цикл, в связи с требованием более тщательного управления параметрами процесса для достижения оптимальной эффективности. Также трубка Ранка имеет сложную конструкцию, а процесс дросселирования считается наименее эффективным по сравнению с турбодетандерным циклом примерно в несколько раз. Дополнительным преимуществом турбодетандера является способность работы с газовыми смесями и опыт его применения наиболее распространён и изучен, по сравнению с другими вышеперечисленными органами редуцирования.

Исследования в области низкотемпературной сепарации показывают потенциал для создания более эффективных и экономически выгодных систем. Применение криогенных технологий, расширение использования жидких азотных и других хладагентов, а также инновационные методы обработки газовых потоков могут значительно улучшить процессы сепарации на объектах подготовки углеводородных газов. Таким образом, можно выделить следующие факторы развития перспектив.

Энергоэффективность: применение низких температур в процессах сепарации может значительно снизить энергозатраты. Например, при использовании криогенных технологий, энергозатраты на сепарацию могут быть существенно уменьшены по сравнению с другими методами.

Улучшение качества продукции: низкотемпературная сепарация позволяет получать более чистые и высококачественные продукты. Это особенно важно для производства углеводородных газов, так как чистота и качество конечного продукта имеют решающее значение для его дальнейшего использования.

Экологическая эффективность: применение низкотемпературной сепарации может способствовать улучшению экологических показателей производства углеводородных газов. Снижение энергозатрат и улучшение чистоты продукции также приводят к снижению выбросов вредных веществ в окружающую среду.

Таким образом, проанализировав научно-техническую литературу, можно сделать вывод, что выбор наиболее эффективного метода зависит от конкретных требований процесса подготовки газов. Эффективность и холодопроизводительность тубодетандерного агрегата определяется качеством работы центробежного компрессора. Оптимизация проточной части центробежного компрессора имеет большое значение для снижения энергопотребления и повышения эффективности работы всей системы сепарации газа. Это особенно актуально в условиях низких температур, когда эффективность работы компрессора существенно снижается из-за конденсации влаги и присутствия твёрдых частиц в газе.

Список используемых источников

- 1. Мигачева Д.С., Хасанов В.В., Ерофеев В.И., Сухих В.С. Конверсия пропан-бутановой фракции в арены на цеолитных катализаторах, модифицированных оксидами галлия // Проблемы геологии и освоения недр: труды XIX Международного симпозиума имени академика М. А. Усова студентов и молодых учёных, посвященного 70-летнему юбилею Победы советского народа над фашистской Германией. Томск: ТПУ, 2015. С. 175–178.
- 2. Эксплуатация магистральных газопроводов. Изд. 2-е, перераб. и дополн. И.Я.Котляр, В. М. Пиляк. Л., "Недра", 1971. 248 с.
- 3. Гухман Л.М. Подготовка газа северных газовых месторождений к дальнему транспорту. Л.: Недра, 2008. 161 с.

- 4. Sachin U. Nandanwar, David R. Corbin, and Mark B. Shiflett A Review of Porous Adsorbents for Separation of Nitrogen from Natural Gas // Industrial & Engineering Chemistry Research, 2020. 63 p.
- 5. Lele Yang, Xiaodong Chen, Chengyu Huang, Sen Liu, Bo Ning, Kai Wang A review of gasliquid separation technologies: Separation mechanism, application scope, research status, and development prospects // Chemical Engineering Research and Design, 2023. Pp. 257–274.

УДК 697.9

ФРИКУЛИНГ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПОМЕЩЕНИЙ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

Кольцов Н.С.¹ (аспирант) Научный руководитель – д.т.н., профессор Цыганков А.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: nikita-koltcov@mail.ru

В статье рассматривается технология фрикулинга, применяемая для охлаждения помещений центров обработки данных с целью повышения их энергоэффективности. В работе приведен анализ существующих методов естественного охлаждения, их преимуществ, ограничений и возможностей адаптации для нужд дата-центров.

Ключевые слова

Центр обработки данных, фрикулинг, энергоэффективность, коэффициент эффективности использования энергии, естественное охлаждение, вентиляция и кондиционирование, инновационные технологии охлаждения, оптимизация энергопотребления.

Проблематика и оценка энергоэффективности центров обработки данных

Центры обработки данных (ЦОД) являются крупными потребителей электроэнергии, а регулирование тепловыделения серверного оборудования играет фундаментальную роль в повышении энергоэффективности таких объектов. Сокращение расходов на электропотребление представляет собой актуальную проблему, требующую комплексного подхода. По статистическим данным [7], до 50% электроэнергии приходится на охлаждение (рис. 1).

Группа потребителей

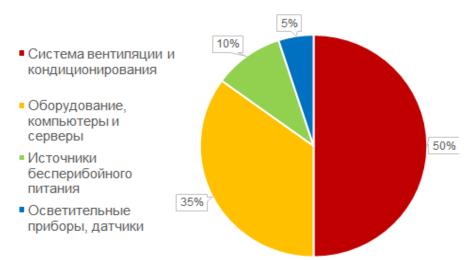


Рис. 1. Потребление электроэнергии ЦОД

Важно отметить, что согласно мировым прогнозам [1], общее потребление электроэнергии постоянно возрастает в значительных масштабах и к 2030 году ожидается достижение общего уровня потребления на уровне приблизительно 848 тераватт электроэнергии (рис. 2).

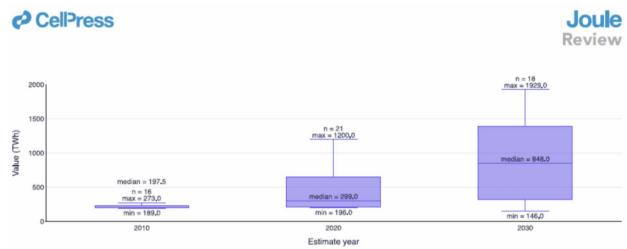


Рис. 2. Глобальные прогнозы энергопотребления центров обработки данных на 2010, 2020 и 2030 годы в тераватт-часах [1]

Мониторинг потребления энергопотребления ЦОД и использование современных технологий способствуют увеличению эффективности систем охлаждения. Оценка эффективности работы ЦОД обычно производится с использованием коэффициента эффективности использования энергии (PUE), впервые предложенного международной организацией Green Grid в 2007 году.

По мнению данной организации, коэффициент PUE предоставляет возможность [4]:

- оценить потенциал увеличения эффективности работы ЦОД;
- сравнить операционные характеристики одного ЦОД с другими;
- определить возможность будущего расширения и перестройки ЦОД;
- оценить возможность подключения дополнительного ІТ-оборудования;
- установить расчетные значения мощности при проектировании нового ЦОД.

Для оценки энергоэффективности применяется и обратная величина коэффициента PUE, известная как DCiE. Возможные оценки эффективности использования ЦОД представлены в таблице ниже.

Таблица Оценка энергоэффективности ЦОД по коэффициентам PUE и DCiE [4]

Оценка	PUE	DCiE
Platinum – идеальная организация ЦОД	<1,25	>0,8
Gold – оптимальная организация ЦОД	1,25~1,43	0,7~0,8
Silver – хорошая организации ЦОД	1,43~1,67	0,6~0,7
Bronze – удовлетворительная организация ЦОД	1,67~2	0,5~0,6
Recognized – возможны улучшения	2~2,5	0,4~0,5
Not recognized – меры для повышения	>2,5	<0.4
энергоэффективности не принимаются	>2,3	<0,4

Таким образом, если коэффициент PUE равен 2, то DCiE будет составлять 50%. Это означает, что половина потребляемой энергии используется на поддержание инфраструктуры дата-центра, в то время как оставшиеся 50% расходуются на ИТ-оборудование. Другими словами, если дата-центр получает 10 МВт мощности из сети, а все оборудование потребляет 5 МВт, коэффициент PUE будет равен 2. При уменьшении разрыва в этих показателях и увеличении потребления оборудования, коэффициент стремится к идеальному значению — 1. На практике значения PUE около 1,10—1,15 считаются оптимальными.

Хочется отметить, что средний уровень PUE постепенно снижается и по данным на 2020 год составляет примерно 1,59 [2]. Однако этот показатель все еще отличается от оптимальных значений и требует дальнейших улучшений (рис. 3).



Рис. 3. График среднего значения PUE в период с 2006 по 2020 год [2]

Исследование эффективности фрикулинга

Классические фреоновые кондиционеры имеют PUE в диапазоне 1,6–1,7, что считается высоким по современным стандартам, в то время как у чиллеров этот показатель составляет около 1,4. Энергоэффективность чиллерной схемы повышается благодаря тому, что внешний компрессорно-конденсаторный блок чиллера включается только при температуре выше 12°С, кроме того, вентиляторы внешнего блока запускаются постепенно по мере увеличения температуры гликолевого теплоносителя [2].

Чиллеры с использованием технологии фрикулинг объединяют преимущества охладительных устройств с сухой градирней, а в условиях умеренного климата России обеспечивают большую экономическую эффективность, особенно при увеличении обрабатываемой площади (рис. 4).

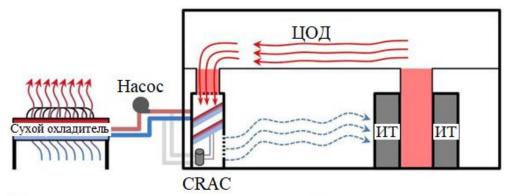


Рис. 4. Схема непрямого водяного фрикулинга с использованием чиллера и прецизионного кондиционера с двумя теплообменниками

Системы фрикулинга широко применяются в промышленных вентиляционных системах с роторными рекуператорами и воздушными теплообменниками (рис. 5). Они основаны на чередующемся контакте лопастей ротора с поступающими потоками горячего отработанного и холодного свежего воздуха. В зимнее время ротор запускается и разгоняется поступающим извне плотным холодным потоком. Если скорости потока недостаточно для разгона лопастей, включается электромотор [6]. PUE такой системы составляет около 1,35.

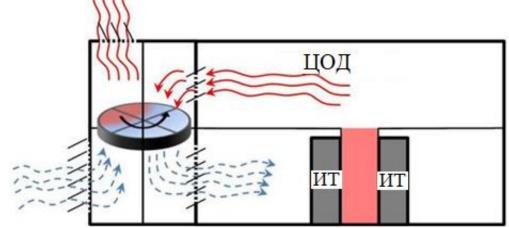


Рис. 5. Схема непрямого воздушного фрикулинга с применением теплового колеса или рекуператора

Метод прямого фрикулинга с дополнительным охлаждением основывается на исключении теплообменников для охлаждения воздуха. Зимой процесс включает предварительное смешение холодного наружного воздуха с теплым в специализированной камере смешения (рис. 6) [2]. Летом для охлаждения может применяться абсорбционная холодильная установка. Данный подход является высокоэффективным с точки зрения энергопотребления и позволяет достигнуть показателя эффективности использования энергии (PUE) на уровне примерно 1,25.

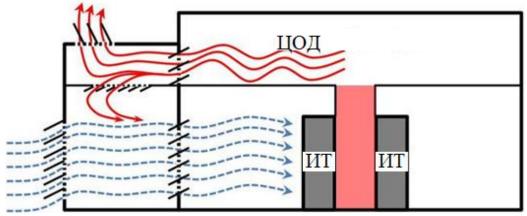


Рис. 6. Схема прямого воздушного фрикулинга с использованием абсорбционного чиллера

Инновационные решения и современные разработки в области фрикулинга

В Норвегии центр обработки данных «Lefdal Mine» является одним из самых эффективных в мире, достигая значения показателя PUE менее 1,1 при общей потребляемой мощности около 200 МВт [5].

В Швейцарии, в регионе Бернер Оберланд в Альпийских горах, используются природные ресурсы для охлаждения двух дата-центров «Swiss Fort Knox I» и «Swiss Fort Knox II». Они размещены в скальном массиве на расстоянии 10 км друг от друга и охлаждаются с помощью подземного озера [5].

В Германии применяется технология двойного фрикулинга, представляющая собой индивидуально разработанное решение типа plug-and-play для каждого дата-центра [8]. Такая система может функционировать как в режиме прямого или косвенного фрикулинга, так и с использованием компрессорного охлаждения. Она оснащена системами увлажнения и осушения воздуха и способна эффективно работать как при частичной, так и при полной нагрузке, обеспечивая при этом показатель эффективности использования энергии (PUE) на уровне 1,2 или ниже.

Компания Яндекс также применяет фрикулинг для своих дата-центров, используя окружающую среду для охлаждения. В результате, в дата-центрах в Сасово и Владимире достигнуты показатели РUE в диапазоне 1,05–1,07, что свидетельствует о высокой энергоэффективности [5].

Среди новейших разработок в области фрикулинга стоит отметить инновационный метод косвенного охлаждения StatePoint Liquid Cooling (SPLC) [3], представляющий собой усовершенствованную систему испарительного охлаждения, которая использует воду вместо воздуха для поддержания оптимальной температуры в центрах обработки данных (рис. 7).

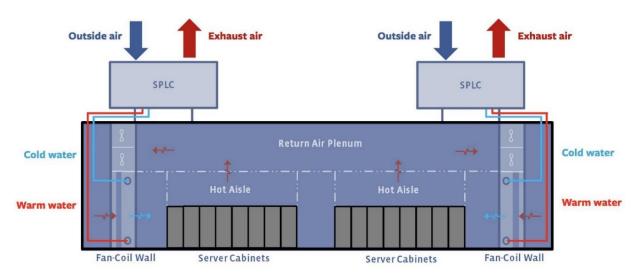


Рис. 7. Непрямое водяное охлаждение SPLC инженеров Facebook и Nortek Air Solutions [3]

Предполагается, что система SPLC будет эффективно функционировать в режиме экономайзера в большинстве климатических условий, минимизируя энергопотребление вентиляционных систем. Практически каждый ватт энергии, поступающий в центр обработки данных, направляется на поддержание работы вычислительной техники с минимальными потерями. В среднем, показатель эффективности использования энергии (PUE) в таких центрах обработки данных составляет 1,10, что указывает на то, что около 10% всей потребляемой энергии расходуется на поддержание инфраструктуры, не связанной с вычислениями.

Система SPLC демонстрирует равные или лучшие показатели PUE по сравнению с традиционными системами прямого испарительного охлаждения даже в условиях жаркого и влажного климата. Применение системы SPLC открывает возможности для строительства центров обработки данных в регионах, которые ранее не рассматривались.

Технология фрикулинга становится все более популярной благодаря своей способности значительно уменьшать энергопотребление, необходимое для охлаждения. Фрикулинг представляет собой перспективный подход к охлаждению центров обработки данных, и будущие исследования могут быть сосредоточенны на следующих аспектах:

- создание более продвинутых систем фрикулинга, адаптированных к разнообразным климатическим условиям;
- разработка систем контроля влажности и стратегий защиты от коррозии и повреждений оборудования;
- совершенствование систем фильтрации и очистки воздуха для минимизации влияния загрязнителей на аппаратуру;
- интеграция и усовершенствование совместимости с другими технологиями, включая применение возобновляемых источников энергии и систем энергохранилищ.

Таким образом, исследование подтверждает высокий потенциал применения технологии фрикулинга для достижения повышенной энергоэффективности центров обработки данных, а внедрение передовых методов охлаждения в будущем способствует сокращению расходов на электроэнергию и устойчивому развитию в сфере информационных технологий.

Список использованных источников

- 1. Mytton D. and Ashtine M. Sources of data center energy estimates: A comprehensive review // Joule. 2022. V. 6. №. 9. Pp. 2032–2056.
- 2. Малеванов К. Как виртуализация делает мир зеленее? Энергоэффективность датацентров. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://selectel.ru/blog/pue-datacenters/ (дата обращения: 14.03.2024).
- 3. Непрямое водяное охлаждение серверов от Facebook и Nortek Как это работает? [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://telecombloger.ru/103472/ (дата обращения: 14.03.2024).
- 4. Определение энергоэффективности и коэффициента эффективности использования энергии (PUE) центра обработки данных. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.deltapowersolutions.com/ru-ru/mcis/white-paper-datacenter-efficiency-and-pue-measurement.php (дата обращения: 14.03.2024).
- 5. Фрикулинг 2.0: зачем дата-центры строят в скалах и вечной мерзлоте. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://kriofrost.academy/lenta/istoriya/frikuling-2-0-zachem-data-centry-stroyat-v-skalah-i-vechnoy-merzlote/ (дата обращения: 14.03.2024).
- 6. Что такое фрикулинг и когда он нужен. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://airflower.ru/blog/konditsionirovanie/chto-takoe-frikuling-i-kogda-on-nuzhen/ (дата обращения: 14.03.2024).
- 7. Энергопотребление дата-центров. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.grandmotors.ru/dc power comsumption.php (дата обращения: 14.03.2024).
- 8. Эрлих А. Кругом вода, или Соблюдение коридора влажности в системах круглогодичного фрикулинга. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://dcforum.kz/krugom-voda-ili-soblyudenie-koridora-vlazhnosti-v-sistemakh-kruglogodichnogo-frikulinga/ (дата обращения: 14.03.2024).

УДК 62-97/-98

АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ РЕГАЗИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПГ

Лисин А.В.¹ (аспирант) Научный руководитель – к.т.н., доцент Соколова Е.В ¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: Art.lisin.27@yandex.ru

В данной работе рассматриваются процессы регазификации с целью поиска наиболее эффективного способа использования энергии сжиженного природного газа (СПГ) для минимизации его потребления при газоснабжении. Для достижения данной цели были выполнены следующие задачи: по результатам анализа существующих регазификационных установок, применяемых для газоснабжения и изучения параметров, влияющих на потребление природного газа (ПГ), был определен среднестатистический график расхода СПГ для отдаленных регионов, при этом был произведен поиск параметров образования отпарного газа. При разработке методов повышения эффективности использования СПГ была циклов проанализирована возможность применения Ренкина В целях теплопоглощающей способности при регазификации СПГ и подогреве ПГ до температуры близкой к температуре окружающей среды.

Ключевые слова

Регазификационный комплекс, газоснабжение, сжиженный природный газ (СПГ), природный газ (ПГ), теплопоглощающая способность.

С развитием технологий и повышением их энергоэффективности, использование сжиженного природного газа (СПГ) получает все большее распространение. На данный момент производство СПГ является одним из самых быстроразвивающихся секторов экономики Российской Федерации. По текущим планам развития к 2035 году Россия будет производить от 100 до 120 млн тонн СПГ в год [1].

На сегодняшний день основными областями применения СПГ являются производство электрической и тепловой энергии. Вместе с этим активно разрабатываются технологии использования теплопоглощающей способности СПГ, получаемой при регазификации [2].

С каждым годом растет число проектов по газоснабжению жилых и промышленных объектов с использованием СПГ, данное направление открывает перспективы утилизации холода СПГ при малотоннажной регазификации [3]. Кроме того, набирает обороты применение СПГ в качестве моторного топлива для различных видов транспорта. Это связано не только с экономической эффективностью, но и с экологической безопасностью этого вида топлива. Таким образом, многообразие способов использования сжиженного природного газа делает его важным и универсальным источником энергии, способным обеспечить разнообразные отрасли промышленности, транспорта и бытовые нужды, содействуя экономическому развитию и снижению вредных выбросов в окружающую среду.

При осуществлении проектов, связанных с использованием природного газа (ПГ), возникает множество логистических проблем. Прежде всего к ним относятся геофизические особенности территории, низкая плотность населения и значительные расстояния между конечными потребителями. Альтернативой трубопроводному транспорту ПГ выступает доставка ПГ в сжиженном состоянии. В большинстве случаев стоимость доставки СПГ значительно ниже, чем стоимость доставки компримированного природного газа (КПГ). В связи с этим стоит отметить, что мобильность поставок СПГ позволяет применять его для газификации удаленных регионов без доступа к централизованной системе газоснабжения.

Регазификационные комплексы играют ключевую роль в процессе газоснабжения посредством СПГ. Они представляют собой инфраструктуру, включающую в себя резервуары для хранения СПГ и регазификаторы, системы безопасности, мониторинга и распределения газа. Эти комплексы обеспечивают надежное и эффективное преобразование сжиженного газа в газообразное состояние для последующего использования потребителями.

Инновационные технологии регазификации играют важную роль в осуществлении таких систем газоснабжения. Эти технологии открывают новые возможности для установки регазификационных комплексов даже в самых отдаленных уголках страны, обеспечивая население газом. Таким образом, перспектива расширения использования СПГ в развитии системы газоснабжения отдаленных регионов становится все более благоприятной, благодаря технологиям регазификации, которые обеспечивают более эффективное использование газа в условиях удаленности от магистральных газопроводов.

Процесс работы регазификационных комплексов включает несколько этапов. Сначала сырье, поступившее на специализированных танкерах или других транспортных средствах, перекачивается в резервуары, где оно сохраняется в сжиженном состоянии. Затем, в момент необходимости, СПГ подвергается процессу регазификации в испарителях, где ему подводится теплота для превращения в пригодный для использования газ. Этот процесс может осуществляться с использованием тепла из окружающей среды или с подведением тепла посредством теплоносителей.

Оптимальным решением, обеспечивающим повышение эффективности регазификационного комплекса, является модернизация системы регазификации. Одним из способов увеличения эксергетических показателей регазификации СПГ является применение систем, использующих теплопоглощающую способность, появляющуюся в результате перевода СПГ в газообразное состояние. На рисунке 1 приведена схема регазификации СПГ с применением циклов Ренкина. На данной схеме представлено два замкнутых контура разной производительности, способных работать попеременно или совместно в зависимости от требуемого количества природного газа.

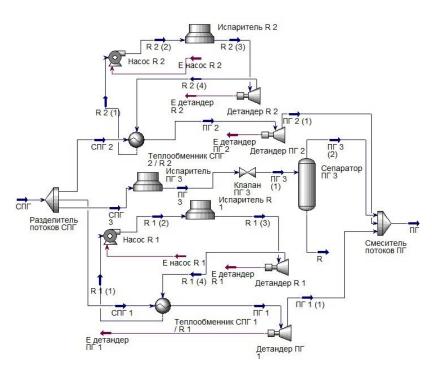


Рис. 1. Регазификация с применением циклов Ренкина

Очередность функционирования первого (R1) и второго (R2) контуров обуславливается климатическими условиями и спросом конечных потребителей на ПГ. На схеме, представленной на рисунке 2, показана среднемесячная очередность функционирования контуров в зависимости от процента загрузки установки.

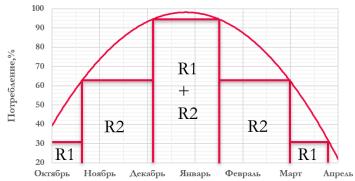


Рис. 2. Очередность функционирования контуров R1 и R2

При указанных параметрах, а именно: температура входящего потока СПГ -129°С и давление 0,8 МПа, температура выходящего потока ПГ -128,8°С и давление 106,325 кПа, было получено, что КПД данной установки составил 16,5%.

Однако более эффективным решением, представленным на рисунке 3, будет являться применение регазификации СПГ и дальнейшего подогрева ПГ до температуры близкой к температуре окружающей с применением циклов Ренкина. Особенностью данной схемы является применение третьего замкнутого контура для получения энергии из теплопоглощающей способности регазифицированного ПГ, а также отпарного газа.

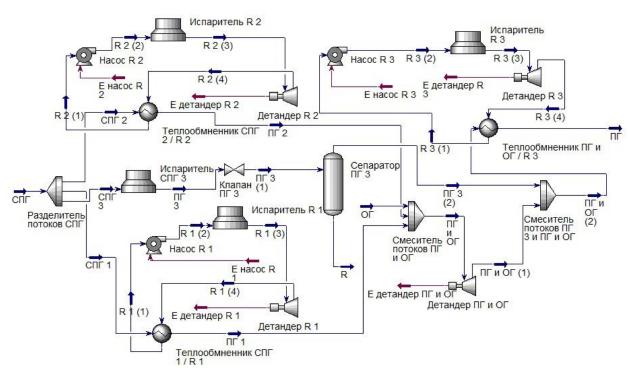


Рис. 3. Регазификация СПГ и подготовка ПГ к использованию с применением циклов Ренкина

Очередность функционирования первого (R1), второго (R2) и третьего (R3) контуров обуславливается климатическими условиями и спросом конечных потребителей на ПГ. На схеме, представленной на рисунке 4, показана среднемесячная очередность функционирования контуров в зависимости от процента загрузки установки. Как можно заметить, в связи с постоянным потоком отпарного газа третий контур работает весь период функционирования комплекса.

При указанных параметрах, а именно: температура входящего потока СПГ -129°С и давление 0,8 МПа, температура входящего потока отпарного газа -113°С и давление 0,8 МПа, температура выходящего потока ПГ -55°С и давление 106,325 кПа, было получено, что КПД данной установки составил 18,7%.

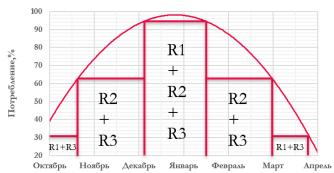


Рис. 4. Очередность функционирования контуров R1, R2 и R3

В качестве хладагента на установках рассматривается этан. Применение данного хладагента обусловлено возможностью его получения из доставляемого СПГ в случае необходимости восполнения объема, циркулирующего в контурах.

При проведении анализа финансовых показателей возможности реализации проекта по модернизации системы регазификации на регазификационном комплексе в среднестатистическом отдаленном населенном пункте было получено, что срок окупаемости данного проекта составляет 8 лет и 103 дня, а дисконтированный срок окупаемости (при ставке дисконтирования 10%) составляет 12 лет и 333 дня. При этом индекс доходности инвестиций составил 3,96, а индекс доходности дисконтированных инвестиций 1,44.

Благодаря применению циклов Ренкина для использования теплопоглощающей способности регазификации СПГ, нагрева ПГ и отпарного газа возможно обеспечить снижение потребления ПГ более, чем на 2%.

Данный способ оптимизации потребления ПГ позволит обеспечить более эффективное использование энергоресурса, обеспечит снижение потребления СПГ, загрязнения окружающей среды и, как следствие, повысит экономическую эффективность реализуемого проекта по газоснабжению.

Однако использование рассмотренного способа регазификации требует особого внимания к повышению автоматизации и контролю энергозатрат на функционирование системы.

Список использованных источников

- 1. Баранов А.Ю., Соколова Е.В., Иванов Л.В., Иконникова А.Ю. Перспективы развития технологий СПГ в Российской Федерации // Вестник международной академии холода. 2023. №. 1. С. 23–34.
- 2. Фальман А.Г., Агейский Д.Э. Перспективы регазификации СПГ // Вестник международной академии холода. -2015. -№ 2. C. 46–49.
- 3. Акулов Л.А., Зайцев А.В. Перспективы утилизации холода сжиженного природного газа при малотоннажной регазификации // Вестник международной академии холода. -2013. -№ 2. C. 29–31.

УДК 621.642

ПОДБОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЕМКОСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ПОСЕЛЕНИЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА

Осипова Е.С. (студент) Научный руководитель – д.т.н., профессор Баранов А.Ю. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: osip.ek@mail.ru

В работе рассматривается возможность использования СПГ в качестве основного энергоносителя в автономных поселениях России. Выполнен анализ особенностей регионов расположения автономных поселений и организации хранения энергоносителей. В работе представлен подбор отечественных емкостей для хранения СПГ и расчет испаряемости. Рассмотрен вариант использования СПГ-хранилища для села Туруханск.

Ключевые слова

Отечественные емкости, испаряемость СПГ, длительное хранение, хранилища с вакуумно-порошковой изоляцией, мембранные хранилища газонаполненной изоляцией.

Развитие рынка природного газа в России тесно связано с развитием рынка сжиженного природного газа (СПГ) и связанного с ним технологий. СПГ позволяет решить проблему энергоснабжения природным газом удаленных регионов и поселений, к которым экономически неэффективно подводить отдельный трубопровод, а также снизить нагрузку на экологию региона. При рассмотрении возможности энергоснабжения малонаселенных и труднодоступных районов Сибири и Дальнего Востока возникают экономические ограничения несмотря на то, что в них ожидается повышение экономической и энергетической активности промышленности в связи с освоением новых территорий и восстановлением ранее закрытых производств. Важнейшей задачей является энергетическое обеспечение предприятий, стабильность поставок энергоносителей и стоимость доставки до мест потребления.

В данных регионах наиболее перспективным энергоносителем является СПГ, так как они зачастую имеют собственные источники природного газа [4]. Заводы по производству СПГ и его потребление вполне возможно организовать на месторождениях или в их окрестностях. Но при этом сценарии возникает логистическая проблема, которая подразумевает налаживание взаимодействия между точками добычами, производства и потребления СПГ в сложных климатических условиях.

Климатические особенности данных регионов заключаются в коротком временном промежутке, когда возможно судоходство, после чего наступает ледостав и закрывается возможность для снабжения. Интенсивная летняя навигация для поставок грузов в удаленные регионы получила полуофициальное название «Северный завоз». Обычно завоз возможен в период с начала мая до конца сентября, то есть 5 месяцев, при этом значительная доля всех грузов составляют продовольствие и энергоносители, такие как нефть, уголь, мазут, в перспективе СПГ [2, 4].

Для реализации сценария снабжения удаленных регионов СПГ необходимо решить две задачи: создать на местах производства СПГ достаточные его запасы и организовать на местах потребления груза хранилища, способные накапливать груз в течение 7–8 месяцев. Обе задачи ранее не рассматривались для территории Российской Федерации. Первая задача имеет очевидное решение. Существует особый вид СПГ заводов, которые созданы для покрытия пиковых нагрузок. Для таких заводов характерны небольшая производительность и большая

емкость хранилищ. Как правило, емкости таких заводов способны накапливать СПГ в течение 200–300 дней, что достаточно для решения первой задачи. С учетом региональных климатических особенностей Сибири и Дальнего Востока, а также сезонности завозов, необходимо проектирование СПГ завода, способного покрыть потребность в регионе, с хранилищем, имеющим необходимый объем, сроком хранения СПГ до 300 дней и возможностью быстрой отгрузки в транспортные средства [3]. Таким образом, задача хранения СПГ на месте доставки может быть решена путем изучения известных емкостей такого рода с дальнейшим их воспроизводством.

Вторая задача является более сложной, так как на другом плече доставки необходимо осуществлять длительный срок хранения груза в значительно меньших объемах относительно завода, при этом объем хранилища должен покрывать годовое потребление и учитывать потери от испаряемости. Возникает необходимость выбора типа криогенных емкостей и оценки экономической эффективности их использования. Несмотря на то, что сфера производства и потребления СПГ в России развита относительно недавно и отечественные технологии производства СПГ находятся в процессе развития, можно использовать для хранения СПГ на месте потребления другие специализированные емкости, например, для жидкого азота или кислорода.

С целью решения второй задачи выполнен поиск отечественных емкостей для хранения криогенных жидкостей у отечественных производителей. В частности, существует Омский научно-технологический комплекс «Криогенная техника», который предлагает широкую линейку криогенных транспортных емкостей, которые можно использовать для хранения азота, кислорода, аргона, а также для СПГ [5]. В ассортименте компании есть емкости объемом до 25–40 м³. Главным отличием от традиционных емкостей для хранения СПГ является низкое рабочее давление — 0,25 МПа. Однако данный недостаток не влияет на возможность использования данных емкостей в качестве хранилищ СПГ на площадках потребителя, так как обычно давление газа в сети не превышает 0,2 МПа. В таблице 1 представлены технические характеристики криогенных цистерн и резервуаров компании.

Таблица 1 **Технические характеристики криогенных цистерн и резервуаров [5]**

_	техни ческие характеристики криотенных цистеры и резервуаров [о]								
Обозначение изделия	ЦТК- 1/0,25М1	ЦТК-2/0,25	ЦТК-2/0,25П	ЦТК- 3/0,25М1					
Вместимость, м ³	1,15	2	2	3					
Рабочее давление, МПа (кгс/см²)		0,25	(2,5)						
N	Ласса хранимого к	риопродукта, кг, н	е более						
 кислород (O₂) 	1250	2100	2100	3200					
- азот (N ₂)	900	1500	1500	2250					
- аргон (Ar)	1530	2600	2600	3950					
Пот	ери криопродукта	от испарения, кг/ч	, не более						
 кислород (O₂) 	0,7	0,78	1,32	1,17					
- азот (N ₂)	0,72	0,83	1,47	1,24					
- аргон (Ar)	0,94	0,96	1,69	1,44					
Масса порожней цистерны, кг, не более	950	1350	1380	2100					
	Габаритные ра	змеры, мм, не бол	ee						
Длина	2600	3780	3780	3600					
Диаметр	1280	1280	1280	1750					
Высота	1350	1350	1400	1800					
Обозначение изделия	ЦТК-5/0,25М1	ЦТК-8/0,25М1	ЦТК- 16/0,25	ЦТК- 19/0,25					
Вместимость, м ³	5,6	8	16	19					
Рабочее давление, МПа (кгс/см²)	0,25 (2,5)								

Продолжение таблицы 1

	T	T		жение гаолицы
Обозначение изделия	ЦТК-5/0,25М1	ЦТК-8/0,25М1	ЦТК- 16/0,25	ЦТК- 19/0,25
N	Ласса хранимого к	риопродукта, кг, н	е более	
 кислород (O₂) 	6100	8600	17400	20650
- азот (N ₂)	4200	6100	12300	14600
- аргон (Ar)	7300	10500	21300	25300
Пот	ери криопродукта	от испарения, кг/ч	, не более	
 кислород (O₂) 	1,55	1,84	3,5	3,8
- азот (N ₂)	1,71	1,88	4	4,1
- аргон (Ar)	2,25	2,63	4,7	4,8
Масса порожней цистерны, кг, не более	3650	3900	7500	7850
	Габаритные ра	азмеры, мм, не бол	ee	
Длина	3900	5100	9600	10900
Диаметр	2100	2100	2100	2100
Высота	2000	2000	2800	2800
Обозначение изделия	ЦТК- 25/0,25	ЦТК- 35/0,25	ЦТК- 40/0,25	
Вместимость, м ³	25	35	40	
Рабочее давление, МПа (кгс/см²)		0,25 (2,5)		
	l нимого криопроду	иста из банаа		
	27200	37800	43200	
- кислород (O ₂) - азот (N ₂)	19200	26900	30800	
` '	33250	46500		
- аргон (Ar)			53200	
		ения, кг/ч, не боле	7	
- кислород (O ₂)	6,1	6,4		
- a3ot (N ₂)	6,5 6,9	7,2 8,6	7,9 9,5	
- аргон (Ar)	0,9	8,0	9,3	
Масса порожней цистерны,	9000	11500	12800	
кг, не более				
	ритные размеры, м		1.4700	
Длина	10000	14010	14700	
Диаметр	2265	2265	2500	
Высота	2980	2980	3100	

Данные таблицы 1 позволяют определить испаряемость для каждого из криогенных продуктов. На примере азота определена испаряемость и сроки хранение для каждой емкости, результаты представлены в таблице 2.

Таблица 2 Эксплуатационные показатели цистерн и резервуаров при хранении жидкого азота

Okonsiya raqvioninbio i	оконуванационные показатели циотерн и резервуаров при хранении жидкого азота								
Обозначение изделия	ЦТК- 1/0,25М1	ЦТК-2/0,25	ЦТК-2/0,25П	ЦТК- 3/0,25М1					
Вместимость, м ³	1,15	2	2	3					
Расчетная испаряемость, кг/сут.	17,280	19,920	29,760	41,040					
Удельная испаряемость, % в сут.	1,920	1,328	1,323	0,977					
Срок полного испарения, сут.	52,083	75,301	75,605	102,339					
Срок полного испарения, мес.	1,736	2,510	2,520	3,411					

_	7	_	_
- 1	Тродолжение	Tabridille	٠,
- 1	Іродої імение	таолицы	_

Обозначение изделия	ЦТК-5/0,25М1	ЦТК-8/0,25М1	ЦТК- 16/0,25	ЦТК- 19/0,25
Вместимость, м ³	5,6	8	16	19
Расчетная испаряемость, кг/сут.	45,120	96,000	98,400	156,000
Удельная испаряемость, % в сут.	0,740	0,780	0,674	0,813
Срок полного испарения, сут.	135,195	128,125	148,374	123,077
Срок полного испарения, мес.	4,507	4,271	4,946	4,103
Обозначение изделия	ЦТК- 25/0,25	ЦТК- 35/0,25	ЦТК- 40/0,25	
Вместимость, м ³	25	35	40	
Расчетная испаряемость, кг/сут.	172,800	189,600	35,280	
Удельная испаряемость, % в сут.	0,642	0,616	2,352	
Срок полного испарения, сут.	155,671	162,447	42,517	
Срок полного испарения, мес.	5,189	5,415	1,417	

Для использования цистерн и резервуаров в качестве емкостей для хранения СПГ необходимо провести оценку их пригодности для длительного хранения СПГ. Из таблицы 2 видно, что потери от испарения криогенных продуктов изменяются в зависимости от состава хранимой жидкости. Следовательно, необходимо произвести расчет для оценки поведения емкостей при хранении сжиженного природного газа.

На основе данных таблицы 1 и 2, можно провести оценку.

Для начала необходимо определить потери жидкого азота от испаряемости с учетом таблицы 1, формула (1):

$$\Delta g_{\text{CVT}} = 24\Delta g_{\text{HaC}},\tag{1}$$

где $\Delta g_{\text{час}}$ – часовые потери жидкого азота (табл. 1).

Относительные суточные потери жидкого азота от испаряемости в % определяются согласно формуле (2):

$$k_{\text{cyt}} = \frac{\Delta g_{\text{cyt}}}{G'},\tag{2}$$

где G' – максимальный вес жидкого азота в цистерне (табл. 1).

Срок полного испарения жидкого азота в цистерне будет рассчитан по формуле (3):

$$\tau_{max} = \frac{100}{k_{\text{CyT}}}. (3)$$

Тепловой поток из окружающей среды к жидкому азоту определяется согласно формуле (4):

$$q_{\rm OC} = \frac{\Delta g_{\rm \tiny Vac}}{3600} r',\tag{4}$$

где r' – парообразования жидкого азота при $P'' = P_{0C}, r' = 199 \frac{\kappa Дж}{\kappa \Gamma}$.

По формуле (5) определяется перепад температур между окружающей средой и жидким азотом:

$$\Delta T_{\rm MB} = T_{\rm OC} - T',\tag{5}$$

где $T_{\rm OC}$, T' — температура окружающей среды и жидкого азота соответственно, $T'=78~{\rm K}$, $T_{\rm OC}=293~{\rm K}$.

Следующий этап – определить примерную площадь теплового ограждения, через которое теплота проникает внутрь цистерны. Для этого используются габаритные размеры емкостей, формула (6):

$$F_{\text{M3}}^* = \pi D_{\text{II}} L_{\text{II}},\tag{6}$$

где D_{u} , L_{u} – ширина и длина цистерны соответственно (табл. 1).

С учетом объема емкости определяется площадь теплопередающей поверхности, которая приходится на единицу объема цистерны, формула (7). Тогда удельная наружная поверхность изоляции:

$$f_{\rm H3} = \frac{F_{\rm H3}^*}{V_{\rm II}},\tag{7}$$

где $V_{\rm II}$ – полезный объем цистерны (табл. 1).

Определенный ранее температурный градиент между окружающей средой и жидким азотом позволяет рассчитать коэффициент теплопередачи вакуумно-порошковой изоляции (ВПИ), которая защищает внутренний объем цистерны от теплопритока, формула (8):

$$k_{\text{M3}} = \frac{q_{\text{OC}}}{\Delta T_{\text{M3}} F_{\text{M3}}^*}.$$
 (8)

Для определения потерь СПГ от испарения проводится аналогичный расчет.

Для начала определяется температурный перепад между окружающей средой и СПГ, формула (9):

$$\Delta T_{\text{M3}} = T_{\text{OC}} - T', \tag{9}$$

где T' – температура СПГ при $P'' = P_{OC}$, T' = 111 К.

Рассчитывается подвод теплоты из окружающей среды к СПГ, формула (10):

$$q_{\rm OC} = k_{\rm M3} \Delta T_{\rm M3} F_{\rm M3}^*. \tag{10}$$

Тогда часовые потери СПГ от испаряемости будут определены формуле (11):

$$\Delta g_{\text{vac}} = \frac{q_{\text{OC}}}{r'},\tag{11}$$

где r' – теплота парообразования СПГ $P''=P_{\mathrm{OC}},\,r'=510rac{\mathrm{к}\mathrm{Дж}}{\mathrm{\kappa}\mathrm{\Gamma}}.$

Суточные потери СПГ от испаряемости, формула (12):

$$\Delta g_{\text{CVT}} = 24\Delta g_{\text{vac}}.\tag{12}$$

Максимальная масса СПГ в цистерне определяется по формуле (13):

$$G_{\text{СПГ}} = V_{\text{II}} \cdot \rho_{\text{СПГ}},\tag{13}$$

где $ho_{\rm СП\Gamma}$ – плотность СПГ $P^{\prime\prime}=P_{
m OC},\,
ho_{
m СП\Gamma}=450 rac{{
m K}\Gamma}{{
m M}^3}.$

Относительные суточные потери СПГ от испаряемости в % и расчетный срок полного испарения сжиженного природного газа в цистерне определяются согласно формулам (14) и (15) соответственно:

$$k_{\rm cyr} = \frac{\Delta g_{\rm cyr}}{G_{\rm CII\Gamma}},\tag{14}$$

$$\tau_{max} = \frac{100}{k_{\text{CVT}}}.\tag{15}$$

Таким образом, полученные эксплуатационные показатели цистерн и резервуаров при хранении СПГ приведены в таблице 3.

Таблица 3

Эксплуатационные показатели цистерн и резервуаров при хранении СПГ Обозначение изделия ЦТК- 1/0,25М1 **ЦТК-2/0,25 ЦТК-2/0,25П ЦТК-3/0,25М1** Вместимость, м³ 1,15 Площадь наружной 10,45 15,19 15,19 19,78 поверхности, м² Площадь удельной 9,087 6,594 7,596 7,596 поверхности, M^2/M^3 293 293 293 293 Температура ОС, К Температура кипения СПГ, К 111 111 111 111 182 182 182 182 Перепад температур, К Удельный теплоприток, Bт/м² 3,224 2,556 4,528 2,933 Теплота парообразования 510 510 510 510 СПГ, кДж/кг 450 450 450 450 Плотность СПГ, $\kappa \Gamma/M^3$ Масса СПГ, кг 517,5 900 900 1350 68,79 Расчетный теплоприток, Вт 33,69 38,84 58,02 Расчетная испаряемость в час, 0,238 0,274 0,486 0,410 ΚГ Расчетная испаряемость в сут. 5,71 6,58 11,65 9.83 Удельная испаряемость в сут., 1,10 0,73 1,29 0,73 % Срок полного испарения, дней 90,67 136,78 77,23 137,34 3,02 2,57 4,58 Срок полного испарения, мес. 4,56 Обозначение изделия ЦТК-5/0,25М1 ЦТК-8/0,25М1 ЦТК-16/0,25 ЦТК- 19/0,25 Вместимость, м³ 5,6 8 16 19 Площадь наружной 25,72 33,63 63,30 71,87 поверхности, м² Площадь удельной 4,592 4,204 3,956 3,783 поверхности, M^2/M^3 293 293 293 293 Температура ОС, К Температура кипения СПГ, К 111 111 111 111 Перепад температур, К 182 182 182 182 Удельный теплоприток, Bт/м² 3,111 2,616 2,957 2,669 Теплота парообразования 510 510 510 510 СПГ, кДж/кг 450 450 450 Плотность СПГ, $\kappa \Gamma/M^3$ 450 Масса СПГ, кг 2520 3600 7200 8550 Расчетный теплоприток, Вт 80,02 87,97 187,17 191,85 Расчетная испаряемость в час, 0,565 0,621 1,321 1,354 ΚГ Расчетная испаряемость в сут. 13,56 14,90 31,71 32,50 Удельная испаряемость в сут., 0,54 0,41 0,44 0,38 % 185,90 227,06 Срок полного испарения, дней 241,56 263,06 8,05 8,77 Срок полного испарения, мес. 6,20 7,57

Прол	должение	табпины	3
1 1002	403 1/1(011710	1 4 6 7 17 14 6 1	_

Обозначение изделия	ЦТК- 25/0,25	ЦТК- 35/0,25	ЦТК- 40/0,25	олжение таолицы о
Вместимость, м ³	25	35	40	
Площадь наружной поверхности, м ²	71,12	99,64	115,40	
Площадь удельной поверхности, м ² /м ³	2,845	2,847	2,885	
Температура ОС, К	293	293	293	
Температура кипения СПГ, К	111	111	111	
Перепад температур, К	182	182	182	
Удельный теплоприток, Вт/м ²	4,277	3,381	3,203	
Теплота парообразования СПГ, кДж/кг	510	510	510	
Плотность СПГ, кг/м3	450	450	450	
Масса СПГ, кг	11250	15750	18000	
Расчетный теплоприток, Вт	304,16	336,91	369,67	
Расчетная испаряемость в час, кг	2,147	2,378	2,609	
Расчетная испаряемость в сут. кг	51,53	57,08	62,63	
Удельная испаряемость в сут., %	0,46	0,36	0,35	
Срок полного испарения, дней	218,33	275,94	287,42	
Срок полного испарения, мес.	7,28	9,20	9,58	

Сравнивая полученные результаты с показателями для азота, приведенные в таблице 2, можно отметить, что расчетная величина потерь СПГ от испаряемости немного меньше, чем в случае хранения жидкого азота. Это связано с большей теплотой парообразования СПГ.

Таким образом, срок хранения СПГ в емкости наименьшего объема составил 90 дней или 3,2 месяца. Следовательно, для поставленной задачи емкость не подходит. Необходимы емкости, которые будут хранить сжиженный природный газ более 7 месяцев.

С учетом вышеприведённых данных из таблицы 3, можно сделать вывод, что только часть отечественных цистерн с ВПИ пригодны для поставленной задачи. Необходимо использовать цистерны с объемом более $8 \, \mathrm{m}^3$.

На примере села Туруханск, расположенном в Красноярского крае, можно определить основные сетевые показатели для цистерн СПГ и сделать вывод о применимости того или иного вида ёмкости. Поселение расположено на побережье р. Енисей, период навигации которого с июня по октябрь составляет порядка 130 дней, имеет численность 3178 человек. Зная потребляемую мощность поселения за год, удельную теплоту сгорания природного газа и арктического дизельного топлива, можно определить, сколько потребуется «голубого топлива» для энергоснабжения на каждого жителя Туруханска.

Для определения рациональности установки хранилища СПГ в Туруханске проводится следующий расчет. Выполняется проверка условия пригодности цистерны к сезонному хранению СПГ, согласно неравенству (16):

$$\tau_{max} > 365 - \tau_{\text{\tiny HAB}},\tag{16}$$

где $365 - \tau_{\text{нав}}$ – продолжительность периода сезонной приостановки навигации, дней.

Суточное потребление природного газа в населенном пункте определяется по формуле:

$$\Delta g_{\Pi\Gamma} = \Delta g_{\text{чел}} N_{\text{Hac}} \,, \tag{17}$$

где $\Delta g_{\text{чел}}$ — средняя потребность населения в природном газе в сутки, кг/чел, $\rho_{\Pi\Gamma}$ - плотность природного газа при нормальных условиях, кг/м³, $N_{\text{нас}}$ — численность населения, чел.

Для оценки пригодности СПГ хранилища необходимо сравнить значения интенсивности образования паров СПГ и потребления природного газа населением.

Если потребление природного газа будет превышать суточные потери СПГ от испаряемости, т. е. численность поселения достаточно велика для утилизации газовой сетью всего испарившегося газа, выражение (18):

$$\Delta g_{\Pi\Gamma} \ge \Delta g_{\text{cyt}}.$$
 (18)

При интенсивности потерь от испарения больше объема потребления природного газа соответствует выражение (19):

$$\Delta g_{\Pi\Gamma} \le \Delta g_{\text{cyr}}.$$
 (19)

В этом случае население поселка недостаточно для использования цистерны с рассматриваемой испаряемостью.

Таким образом, для каждой емкости существует минимальная численность населения, при которой возможно ее использование в системе газоснабжения, которая определяется по формуле (20):

$$N_{\text{Hac}}^{min} = \frac{\Delta g_{\text{cyr}}}{\Delta g_{\text{чел}}}.$$
 (20)

При учете продолжительности автономного газоснабжения, известной для каждого региона по формуле (21):

$$\tau_{\text{abt}} = 365 - \tau_{\text{Hab}},\tag{21}$$

можно для каждой емкости объемом от 8 м³ оценить максимально число жителей поселения, которое может использовать данную емкость для газоснабжения, формула (22):

$$N_{\text{Hac}}^{max} = \frac{G_{\text{СПГ}}}{\Delta g_{\text{чел}} \cdot \tau_{\text{авт}}},$$
 (22)

где $\Delta v_{\rm чел}$ – средняя потребность населения в природном газе в сутки, кг/чел.

Результаты расчета по данным поселения Туруханск отражены в таблице 4.

Таблица 4 Определение сетевых показателей криогенных емкостей серии **LTK**

	TAREA		•				
Обозначение	ЦТК-	ЦТК-	ЦТК-	ЦТК-	ЦТК-	ЦТК-	
изделия	8/0,25M1	16/0,25	19/0,25	25/0,25	35/0,25	40/0,25	
Вместимость, м ³	8	16	19	25	35	40	
Масса СПГ, кг	3600	7200	8550	11250	15750	18000	
Расчетная				_, _,			
испаряемость,	14,90	31,71	32,50	51,53	57,08	62,63	
кг/сут.							
Удельная							
испаряемость, % в	0,41	0,44	0,38	0,46	0,36	0,35	
сут.							
Срок полного	241,56	227,06	263,06	218,33	275,94	287,42	
испарения, сут.	241,30	227,00	203,00	210,55	273,94	267,42	
Минимальная							
численность	1073	2284	2340	3711	4110	4510	
населения, чел							
Максимальная							
численность	1103	2206	2620	3447	4826	5515	
населения, чел							

Таким образом, для поселений, численность которых меньше минимальной или больше максимальной, необходим индивидуальный подход к подбору оборудования, например использование комбинации различных криогенных емкостей или поиск меньшего по объему

сосуда. Для энергоснабжения рассматриваемого населенного пункта в период ледостава будет достаточно установить одну емкость ЦТК-25/0,25, так как максимальная численность населения, которую может снабдить данное хранилище, превышает численность населения поселка Туруханск. Из расчета видно, что есть возможность обеспечить в энергоносителе большее количество человек или коммунальное хозяйство, промышленность, транспорт, работающий на компримированном природном газе.

Для поселений, численность которых превышает значение $N_{\rm Hac}^{max}$, следует создавать хранилища из нескольких криогенных цистерн, при этом каждая дополнительная емкость будет выделять в газовую сеть дополнительный поток паров природного газа. Тогда поступление паров СПГ в потребительскую сеть будет определять, как сумма потерь от испаряемости всех емкостей, включенных в состав хранилища СПГ, формула (23):

$$\Delta g_{\Pi\Gamma}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta g_{\Pi\Gamma}^{i}. \tag{23}$$

Принимая во внимание высокую стоимость емкостей для хранения криогенных жидкостей, которая составляет не менее одного миллиона рублей за 1 м³ объема хранения, следует в каждом отдельном случае выполнять технико-экономический анализ. В частности, следует рассчитывать рентабельность хранения СПГ в емкостях с вакуумной тепловой изоляцией и оценивать целесообразность использования мембранных хранилищ с газонаполненной изоляцией, которые широко применяются для крупнотоннажного хранения [1].

Отличительной особенностью современных хранилищ с газонаполненной изоляцией является наличие у цилиндров большого диаметра вертикальной оси симметрии. Диаметр изоляционной конструкции во много раз превышает ее толщину, поэтому перенос теплоты через боковые и торцевые поверхности хранилища можно рассмотреть, как перенос теплоты через плоскую стенку.

В таком случае расчет коэффициента теплопередачи теплового ограждения может быть определен согласно формуле (24):

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_{\text{BH}}} + \frac{\delta_{\text{M3}}}{\lambda_{\text{M3}}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{Hap}}}},$$
(24)

где $\alpha_{\rm BH}$, $\alpha_{\rm Hap}$ — коэффициенты конвективной теплоотдачи на внутренней и наружной поверхности хранилища соответственно, $\delta_{\rm H3}$, $\lambda_{\rm H3}$ - толщина и средняя теплопроводность слоя теплоизоляции соответственно, δ_i , λ_i -толщина и средняя теплопроводность слоя теплоизоляции прочих слоев теплового ограждения соответственно.

Принимая во внимание значительную толщину изоляции $\delta_{\rm из} \ge 0.7$ м и малую теплопроводность теплоизоляционного материала $\lambda_{\rm из} \le 0.04 \frac{\rm B_T}{\rm M\cdot K}$, влиянием остальных слагаемых для определения значения коэффициента теплопередачи на величину термического сопротивления теплового ограждения можно пренебречь. Тогда, выражение (24) примет вид:

$$\frac{\delta_{\text{\tiny M3}}}{\lambda_{\text{\tiny M3}}} \gg \frac{1}{\alpha_{\text{\tiny BH}}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{\tiny Hap}}},\tag{25}$$

или

$$\frac{1}{\alpha_{\text{BH}}} + \sum_{i=1}^{i=n} \frac{\delta_i}{\lambda_i} + \frac{1}{\alpha_{\text{Hap}}} \approx 0. \tag{26}$$

Интенсивность переноса теплоты через тепловое ограждение будет зависеть только от выбора теплоизоляционного материала и толщины теплоизоляционного слоя, формула (27):

$$k = \frac{\lambda_{\text{M3}}}{\delta_{\text{M3}}}. (27)$$

Перенос теплоты через боковую и торцевые поверхности теплоизоляционной конструкции осуществляется с одинаковой интенсивностью. Таким образом, можно

проанализировать эффективность использования емкостей с газонаполненной изоляцией для сезонного хранения сжиженного природного газа в системах локального газоснабжения.

Для анализа можно воспользоваться упрощенной физической моделью мембранного хранилища СПГ, которая представлена как цилиндр с двумя характеристическим размерами: внутренним диаметром D_{xp} и высотой H_{xp} на рисунке 1.

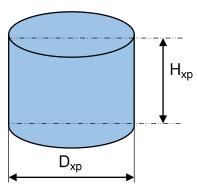


Рис. 1. Физическая модель мембранного хранилища СПГ

Полезный объем хранилища с газонаполненной изоляцией определятся по формуле (28):

$$V_{\rm xp} = \frac{\pi}{4} D_{\rm xp}^2 \cdot H_{\rm xp}. \tag{28}$$

Внутренняя поверхность теплового ограждения хранилища, формула (29):

$$F_{\rm xp} = \pi D_{\rm xp} \cdot H_{\rm xp} + \frac{\pi}{2} D_{\rm xp}^2.$$
 (29)

Для выполнения анализа тепловых процессов в хранилище вводится переменная, равная отношению высоты хранилища к диаметру, формула (30):

$$a_{xp} = \frac{H_{xp}}{D_{xp}}. (30)$$

Тогда внутренний объем хранилища составит (31):

$$V_{\rm xp} = \frac{\pi}{4} D_{\rm xp}^3 \cdot a_{\rm xp},\tag{31}$$

а внутренняя поверхность газонаполненной изоляции (32):

$$F_{\rm xp} = \pi D_{\rm xp}^2 \left(a_{\rm xp} + \frac{1}{2} \right). \tag{32}$$

Удельная поверхность тепловой изоляции т. е. отношения площади теплоизоляционных конструкций к единице объема СПГ, определяется по формуле (33):

$$f_{\rm xp} = \frac{F_{\rm xp}}{V_{\rm xp}} = \frac{4(a_{\rm xp} + \frac{1}{2})}{D_{\rm xp} \cdot a_{\rm xp}} = \frac{4a_{\rm xp} + 2}{D_{\rm xp} \cdot a_{\rm xp}}.$$
 (33)

Изменяя величину отношения высоты объема хранения СПГ к диаметру в интервале $0.1 \le a_{\rm xp} \le 5.0\,$ можно построить график зависимости $f_{\rm xp} = f\left(a_{\rm xp}\right)$ при $D_{\rm xp} = 1$, который представлен на рисунке 2.

График, приведенный на рисунке 2 показывает, что уменьшение величины удельной теплопередающей поверхности происходит при увеличении отношения высоты объема хранения СПГ к диаметру в пределах $a_{\rm xp} < 1,5$. Увеличение высоты хранимого СПГ создает дополнительные трудности при заполнении и опорожнении хранилища, поэтому дальнейший анализ ведется с учетом, что $a_{\rm xp} = 1,5$. Тогда выражения для расчёта удельной теплопередающей поверхности изоляции и объёма, заполненного СПГ примут вид (34):

$$f_{\rm xp} = \frac{8}{1,5D_{\rm xp}}, V_{\rm xp} = \frac{1,5\pi}{4}D_{\rm xp}^3.$$
 (34)

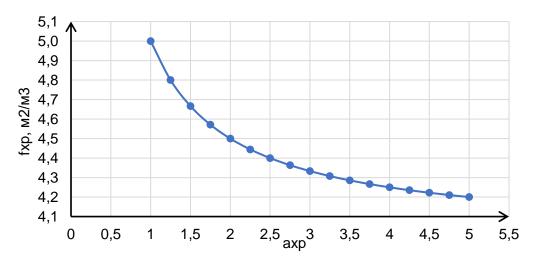


Рис. 2. Зависимость величины удельной поверхности изоляции от выбора отношения высоты емкости к диаметру

Используя эти выражения, можно рассчитать эксплуатационные показатели хранилищ с газонаполненной изоляцией при разных значениях внутреннего диаметра и рассчитать потери СПГ от испаряемости.

Полагая, что хранение природного газа осуществляется при давлении близком к атмосферному, принимается температура сжиженного природного газа $T_{\rm CП\Gamma}=111~{\rm K}.$ Температура окружающей среды $T_{\rm OC}=293~{\rm K},$ толщина слоя теплоизолятора $\delta_{\rm из}=0.7~{\rm m},$ средняя температура слоя теплоизолятора (35):

$$T_{\text{H3}} = \frac{T_{\text{СПГ}} + T_{\text{OC}}}{2} = 202 \text{ K.}$$
 (35)

Теплопроводность изоляционного материала при средней температуре $\lambda_{\rm из} = 0.03~{\rm Bt/(m~K)}$. Плотность теплового потока через изоляционную конструкцию, формула (36):

$$q_{\rm H3} = k(T_{\rm OC} - T_{\rm CHIT}). \tag{36}$$

Удельный подвод теплоты к единице объема СПГ рассчитывается по формуле (37):

$$q_{\nu} = q_{\mu_3} \cdot f_{xp}. \tag{37}$$

Часовые потери СПГ от испаряемости в единице объема хранения, формула (38):

$$\Delta g_{\text{vac}} = 3600 \frac{q_v}{r'}.\tag{38}$$

Относительные суточные потери СПГ от испаряемости %, формула (39):

$$k_{\rm cyr} = \frac{24\Delta g_{\rm vac}}{\rho_{\rm CHF}}.$$
 (39)

Зависимость значения коэффициента суточной испаряемости от диаметра хранилища в графическом виде представлена на рисунке 3.

Из графика 2 видно, что по показателям суточной испаряемости хранилище с газонаполненной изоляцией диаметром более 5 м превосходят криогенные емкости с вакуумно-порошковой изоляцией. При максимальном диаметре резервуара расчетные значения суточной испаряемости снизились до 0,05%.

Полученные результаты несколько улучшают истинную картину потерь СПГ от притока теплоты, так как в расчете не учитывается подвод теплоты по тепловым мостам в виде

трубопровода и арматуры. Несмотря на это, можно сделать заключение, что использование резервуаров с газонаполненной изоляцией для хранения СПГ обоснованно для крупных поселений. Данные резервуары имеют большой объем хранения и длительный срок полного испарения, что представлено в таблице 5.

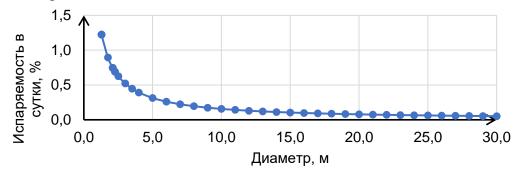


Рис. 3. Зависимость значения коэффициента суточной испаряемости от диаметра хранилища

Таблица 5
Расчетные значения времени полного испарения СПГ для емкостей с газонаполненной изоляцией с разным внутренним диаметром

изоляцией с разным внутренним диаметром											
Диаметр емкос- ти, м	2,5	3,0	3,5	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0	10,0	15,0
Вмести- мость, м ³	18,4	31,8	50,5	75,4	147,3	254,5	404,1	603,2	858,8	1178,1	3976,1
Масса СПГ, кг	828 3	1431 3	2272 9	3392 9	66267	11451 1	18183 9	27143	38647 4	53014	178923 5
Срок испаре- ния, сут.	160	192	223	255	319	383	447	511	575	639	958
Срок испаре- ния, мес.	5,3	6,4	7,4	8,5	10,6	12,8	14,9	17,0	19,2	21,3	31,9

Емкости с газонаполненной изоляцией с внутренним диаметром более 3,5 м, объемом от 50,5 м³ соответствуют всем условиям сезонного хранения СПГ на пунктах автономного газоснабжения удаленных поселений и промышленных объектов. Учитывая относительную простоту и технологичность конструкции резервуаров этого типа, они могут быть смонтированы на месте эксплуатации. Однако, включая во внимание то, что логистика в удаленных регионах опирается на наличие речной акватории, перспективным является распространение системы автономного газоснабжения с использованием мембранных хранилищ СПГ в плавучих гравитационных платформах. Такие плавучие хранилища можно было бы изготавливать в заводских условиях, затем буксировать к месту эксплуатации.

Выполненный анализ вариантов обеспечения населенных пунктов автономным газоснабжением и соответствующим емкостным оборудованием, на примере Туруханского поселения, для сезонного хранения СПГ показал:

- в Российской Федерации производятся цистерны и транспортные криогенные цистерны (ЦТК), которые по своим эксплуатационным характеристикам пригодны для использования при построении логистических схем снабжения удаленных потребителей сжиженным природным газом;
- учитывая разные показатели по потерям сжиженного природного газа при хранении, для сезонного хранения СПГ на пункте локального газоснабжения пригодны криогенные цистерны с вакуумно-порошковой изоляцией объемом не менее 8 м³;

- для рационального использования сжиженного природного газа необходимо использовать криогенные цистерны в газораспределительных сетях, в которых суточное потребление природного газа превышает количество паров, образующихся в криогенной цистерне за счет подвода теплоты из окружающей среды;
- при проектировании пунктов автономного газоснабжения, потребляющих более 23000 м³ природного газа, целесообразно рассматривать замену цистерн серии ЦТК мембранными хранилищами с газонаполненной изоляцией;
- изготовление мембранных хранилищ рационально организовать с использованием заводских комплектующих, как это принято при строительстве крупнотоннажных хранилищ заводов СПГ.

Список использованных источников

- 1. Иванцова С.Г. Анализ технических решений при изготовлении и строительстве мембранных изотермических резервуаров сжиженного природного газа // Транспорт и хранение нефтепродуктов и углеводородного сырья. 2018. № 2. С. 44–48.
- 2. Книжников А.Ю., Климентьев А.Ю. Потенциал газификации Арктики сжиженным природным газом // Деловой журнал Neftegaz.ru. 2018. № 5. С. 36–45.
- 3. Мильман В.С., Перов В.Б. Сжиженный природный газ в энергетике // Энергетика, экология, энергосбережение. -2023. -№. 1. C.3-5.
- 4. Соколов Ю.И. Риски северного завоза // Проблемы анализа риска. -2019. Т. 16. №. 4. С. 32–47.
- 5. Цистерны и резервуары криогенные / Научно-технологический комплекс «Криогенная техника» [Электронный ресурс]. Режим доступа: Цистерны и резервуары криогенные от завода-производителя НТК Криогенная Техника (cryontk.ru) (дата обращение 07.01.2024).

УДК 621.59

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ СПГ

Сафтли $A.^{1}$ (аспирант) Научный руководитель — к.т.н., доцент Зайцев $A.B.^{1}$

1 – Университет ИТМО

e-mail: adhamsaftly1994@gmail.com

Одним из наиболее важных вопросов при анализе технологического процесса хранения сжиженного природного газа, как многокомпонентной жидкости, является реализация удобной расчетной системы, основанной на известных соотношениях и методиках с выполнением термодинамических расчетов свойств смесей, определением фазового равновесия и др. В статье приводятся результаты разработки и применения методики для процесса бездренажного хранения бинарной смеси, состоящей из чистого метана и сравнительно небольшого количества азота.

Ключевые слова

Бездренажное хранение, отпарные газы, парожидкостное равновесие, уравнения состояния, компонентный состав.

Несмотря на политическую нестабильность, в последние годы продолжается переход стран на природный газ в качестве альтернативного источника топлива для удовлетворения своих потребностей и обеспечения устойчивых поставок энергии, снижения зависимости от нефти и смягчения негативного воздействия на глобальный климат и окружающую среду [1].

Постепенно становится очевидно, что значительные объемы новых запасов газа географически расположены не так удобно. В результате этого на рынке утвердился новый подход, а именно – предварительное получение сжиженного природного газа (СПГ), который теперь определяет одну из наиболее эффективных и безопасных технологий транспортировки и хранения энергоносителей.

Тем не менее, развитие технологий СПГ сталкивается с различными проблемами, как в процессе транспортировки, так и в процессах загрузки/разгрузки и хранения. Данное исследование направлено на решение этих проблем путем моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ. Цель состоит в том, чтобы улучшить нашу способность прогнозировать изменения отдельных параметров СПГ при хранении и эксплуатации в результате колебаний температуры, давления и состава в различных элементах технологического оборудования.

1. Критические процессы в емкостях СПГ

1.1. Проблема отпарного газа

В цепочке поставок СПГ в процессе погрузки и разгрузки, во время транспортировки, а также в резервуарах для хранения возникает так называемый отпарной газ (Boil-of-Gas, BOG), поскольку в этих емкостях невозможно обеспечить идеальную изоляцию и теплопритоки из окружающей среды постепенно воздействуют на ёмкость.

Испарение жидкости вызывает повышение давления в резервуаре для хранения СПГ. Это в свою очередь влияет на безопасность процесса хранения. Кроме того, в процессе испарения изменяется термодинамическое состояние парожидкостной смеси в резервуаре-хранилище, что влияет на составы сжиженного природного газа и отпарного газа и на итоговую стоимость продукта.

1.2. Проблема стратификации и ролловера

В результате неравномерного прогрева жидкости из-за теплопритока из окружающей среды в резервуаре возникает температурное разделение (стратификация) на слои. Более

нагретая жидкость поднимается в верхний слой и испаряется с поверхности раздела фаз. При этом испаряются преимущественно легкие газы, а жидкость в верхнем слое становится более плотной. Это явление называется «выветриванием».

В определенный момент времени система становится неустойчивой и возникает явление «опрокидывания», называемое ролловер (rollover) СПГ, когда происходит взрывной процесс перемешивания и вскипания. Основная опасность при этом заключается в быстром выделении большого количества паров, что может привести к потенциальному избыточному давлению в резервуаре и аварии.

2. Численный метод исследования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ

Прогнозирование фазового равновесия играет важную роль при хранении СПГ, поскольку оно определяет количество вероятного присутствия пара, жидкости и нежелательных твердых частиц. В реальных условиях полностью равновесное состояние трудно реализуемо, однако при рассмотрении динамических процессов с достаточно малым временным шагом по времени они могут быть описаны в терминах теории фазового равновесия. Для описания равновесных явлений системы газ-жидкость в криогенных условиях можно успешно использовать несколько уравнений состояния. Наиболее часто используемые уравнения для сжиженного природного газа или природного газа в криогенных условиях представляют собой классическую модель Пенга—Робинсона.

К сожалению, прогнозы симуляторов часто существенно расходятся с фактическими наблюдениями. Например, было обнаружено, что уравнение состояния Пенга-Робинсона, реализованное по умолчанию в Aspen HYSYS, дает прогнозы содержания жидкой фазы, которые превышают экспериментальные неопределенности в 3, 42 и 81 раз в трех различных расчетах [2]. Частично это связано с неточностями, связанными с пакетом свойств, встроенным в моделирование и используемым для расчета термодинамических свойств смесей природного газа при различных условиях процесса. Поэтому исследователи зачастую вместо использования известных моделирующих пакетов создают собственные модели.

Условно математическую модель термодинамической системы можно разделить на описание процессов в соответствии с теоретическими основами и на закономерности протекания этих процессов в конкретных видах технологического оборудования. Это позволяет создавать достаточно универсальные модели, применимые для различных устройств и установок.

Рассмотрим многокомпонентную двухфазную систему безотносительно к конкретным единицам оборудования. Для определения удельных физических величин будем использовать молярные значения. Предлагаемый метод основывается на одновременном параллельном вычислении свойств жидкой фазы, паровой фазы и двухфазной смеси.

Уравнение мольного материального баланса. Исходная смесь содержит n компонент с мольной долей i-й компоненты z_i , в том числе x_i в жидкой фазе и y_i в паровой фазе. Количество вещества в смеси N молей, в том числе N_i молей i-й компоненты, причем в жидкой фазе всего N' молей и в паровой фазе N'' молей.

$$N = \sum_{i=1}^{n} N_i = N' + N''. \tag{1}$$

Уравнение баланса объемов фаз.

$$V = V' + V''. \tag{2}$$

Выражения для мольных объемов.

$$v = \frac{V}{N_{:}}v' = \frac{V}{N'_{:}}v'' = \frac{V}{N''},\tag{3}$$

где υ – мольный объём, моль/м³.

Уравнение состояния Пенга-Робинсона (PR) [3].

$$p = \frac{RT}{v - b} - \frac{a}{v(v + b) + b(v - b)},\tag{4}$$

где p — давление, Па; R — универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К); T — температура, К.

$$a = \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{n} x_{i} x_{j} (a_{i} a_{j})^{0.5} (1 - k_{ij}); a_{i} = a_{ci} \alpha_{i}; a_{ci} = 0.457235 \frac{(RT_{ci})^{2}}{p_{ci}},$$

$$\alpha_{i}^{0.5} = 1 + m_{i} \left[1 - \left(\frac{T_{i}}{T_{ci}} \right)^{0.5} \right]; m_{i} = 0.37646 + 1.5422 \omega_{i} - 0.26992 \omega_{i}^{2},$$

$$b = \sum_{i=1}^{n} x_{i} b_{i}; b_{i} = 0.077796 \frac{(RT_{ci})^{2}}{p_{ci}},$$

 k_{ij} — коэффициент парного взаимодействия; ω — ацентрический фактор; нижний индекс «с» относится к критическим свойствам.

Кубическая форма уравнения состояния Пенга-Робинсона относительно коэффициента сжимаемости Z.

$$Z^{3} + (1 - B)Z^{2} + (A - 2B - 3B^{2})Z - (AB - B^{2} - B^{3}) = 0;$$

$$A = \frac{ap}{(RT)^{2}}; \quad B = \frac{bp}{RT}.$$
(5)

Формулы Кардано-Виета для решения кубического уравнения. Для решения уравнения третьей степени (5) применяется широко известные формулы. При расчете жидкой фазы в качестве решения выбирается минимальный положительный корень, при расчете паровой фазы — максимальный положительный корень.

Уравнения состояния, выраженные через коэффициент сжимаемости Z.

$$pv = ZRT; pv' = Z'RT; pv'' = Z''RT.$$
 (6)

Выражение для мольной энтальпии. Энтальпия вычисляется с применением уравнения состояния Пенга-Робинсона. Мольная энтальпия идеального h^* газа вычисляется по известной аппроксимации данных полиномом [3].

$$\frac{h-h^*}{RT} = Z - 1 - \frac{1}{2^{1.5}hRT} \left(a - T \frac{da}{dT} \right) ln \left[\frac{v + (2^{0.5} + 1)b}{v + (2^{0.5} - 1)b} \right]. \tag{7}$$

При необходимости аналогичные выражения можно получить для мольной энтропии и теплоёмкости.

Определение мольной доли при расчете фазового равновесия.

$$V_m = \frac{V^{"}}{V}. \tag{8}$$

По величине мольной доли в расчетах определяется соответствующее фазовое состояние смеси: $V_m < 0$ — ненасыщенная (недогретая) жидкость; $V_m = 0$ — насыщенная жидкость, точка начала кипения, давление равно упругости паров; $0 < V_m < 1$ — двухфазная смесь; $V_m = 1$ — точка росы; $V_m > 1$ — перегретый пар [4].

Уравнения фазового равновесия. Из уравнений материального баланса компонент в паровой и жидкой фазах смеси

$$z_{i} = (1 - V_{m})x_{i} + V_{m}y_{i} \tag{9}$$

с учетом определения константы фазового равновесия

$$K_i = \frac{y_i}{x_i} \tag{10}$$

получаем уравнения фазовых концентраций

$$x_i = \frac{z_i}{V_m(K_i - 1) + 1}; y_i = \frac{z_i K_i}{V_m(K_i - 1) + 1}.$$
 (11)

Используя уравнения фазовых концентраций и уравнения баланса компонент в фазах

$$\sum_{i=1}^{n} z_i = 1; \quad \sum_{i=1}^{n} x_i = 1; \quad \sum_{i=1}^{n} y_i = 1,$$
 (12)

можно получить формулу Рэчфорда-Райса, соответствующую условиям фазового равновесия [5]:

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{z_i(K_i-1)}{V_m(K_i-1)+1} = 0.$$
 (13)

 Φ ормула Вильсона для константы фазового равновесия. Поскольку при умеренных давлениях до 700 кПа можно считать константу фазового равновесия для смесей легких компонентов до C_6 по приближению идеального газа, применяется формула:

$$K_i = \frac{p_{ci}}{p} exp \left[5.31(1 + \omega_i) \left(1 - \frac{T_{ci}}{T} \right) \right]$$
 (14)

3. Результаты расчета бездренажного хранения

Распространим приведенную методику на конкретный технологический процесс — бездренажное хранения метана с примесью небольшого количества азота. Исходная жидкая смесь с мольным составом 95% метана и 5% азота заливается в цистерну 45 м³ при давлении 0,11 МПа и температуре 106 К, и занимает там объем, соответствующий коэффициенту объемного заполнения жидкостью 0,8.

Из *первого закона термодинамики* для изохорного процесса при отсутствии внешней работы следует, что теплота, подводимая к системе, полностью расходуется на изменение внутренней энергии, т. е.

$$q = \frac{\Delta Q}{\Delta \tau}; \Delta Q = \Delta H = N \Delta h, \tag{15}$$

где q — теплоприток, Вт; ΔQ — теплота, Дж; $\Delta \tau$ — время, с.

$$h = (1 - V_m)h' + V_m h''. (16)$$

В соответствии с моделью (1)–(16) разработан алгоритм и создана соответствующая программа. Результаты тестовых расчетов при теплопритоке 100 Вт приведены на рис. 1–4. Проверка адекватности показала хорошее совпадение расчета фазового равновесия [4] – расхождение до 2 %, и больший процент расхождения при расчете хранения в ёмкости из-за большого разброса вычисляемых разными авторами калорических свойств – энтальпии, энтропии и др.

Графики иллюстрируют следующий процесс. Поступление в ёмкость теплоты приводит к нарушению фазового равновесия. В результате часть молей переходит из жидкой фазы в паровую. При этом часть полученной теплоты уходит на повышение температуры смеси. Молярный объём и реальный объём жидкости увеличивается, и это объемное расширение жидкости происходит быстрее, чем рост объёма пара за счет испарившихся молей. В замкнутом объеме происходит уменьшение объёмной доли пара и рост давления до выполнения условий фазового равновесия.

После загрузки смеси в ёмкость мольная концентрация азота в паре сразу устанавливается на уровне 54% и затем постепенно снижается. Концентрация азота в жидкости изменяется очень слабо. Представленная картина сильно зависит от объёма хранимой жидкости.

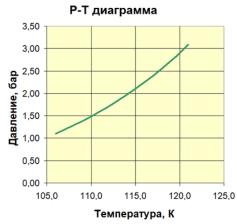
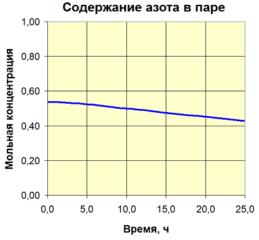
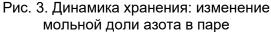


Рис. 1. Функция p(T) для смеси в замкнутом объёме



Рис. 2. Динамика хранения: рост доли объёма с жидкой фазой





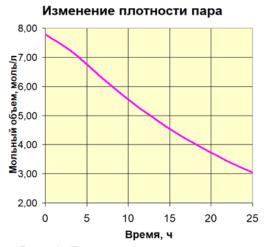


Рис. 4. Динамика хранения: уменьшение молярного объёма пара

После достаточного количества численных экспериментов данный подход к решению определенного класса задач можно считать ядром методики и распространить его на другие процессы, связанные с СПГ-технологиями.

Выводы:

- 1. При разработке методики моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах СПГ получена логическая схема (алгоритм) расчета параметров двухфазной смеси, основанная на совместном решении уравнений фазового равновесия, уравнения состояния и уравнений материального и энергетического баланса в конкретном устройстве.
- 2. Выбранный расчетный аппарат в виде электронной таблицы с возможностью применения макросов обладает достаточной простотой и наглядностью, легок в обучении и применении и представляется перспективным для дальнейшего использования при исследованиях технологических процессов СПГ.
- 3. Развитие представленной модели позволяет в дальнейшем:
 - провести исследования с применением модели бездренажного хранения, хранения с удалением отпарных газов, загрузки/опорожнения ёмкости и др.;
 - распространение результатов разработки методики на большее количество компонент (смесь C_1 – C_4 + N_2);
- объединение методики моделирования процессов в многокомпонентных двухфазных системах с методикой оптимизации соответствующего оборудования.
- 4. Рассмотрение жидкой фазы как две отдельные фазы с разной плотностью позволит применить методику для анализа процесса ролловера.

Список использованных источников

- 1. Mokhatab S., Poe W.A., Zatzman G., Islam M.R., van Wassenhove W., Wahab A.A. Handbook of natural gas transmission and processing // Second edition. The Boulevard, Langford Lane, Oxford, Kidlington, OX5 1GB, UK. 2012. 802 p.
- 2. Corey J.B. Phase Equilibrium Measurements and Advanced Modelling for Optimising Liquefied Natural Gas Production. Degree of Doctor of Philosophy, University of Western Australia, Department of Chemical Engineering, 2018. 398 p.
- 3. Peng D.Y., Robinson D.B. A Two Constant Equation of State // I.E.S. Fundamentals. 1976. №. 15. Pp. 59–64.
- 4. Брусиловский А.И. Фазовые превращения при разработке месторождений нефти и газа. М.: Грааль, 2002. 575 с.
- 5. Włodek T. Phase equilibria for liquefied natural gas (lng) as a multicomponent mixture // AGH Drilling, Oil, Gas. 2015. Vol. 32. №. 3. Pp. 539–550. DOI: 10.7494/drill.2015.32.3.539.

УДК 621.593

МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ОЖИЖИТЕЛЯ ПРОДУКЦИОННОГО АЗОТА

Старцев Е.С.¹ (студент) Научный руководитель – к.т.н., доцент Зайцев А.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: Zhenechek0@yandex.ru

С помощью схемы детандерного цикла решается задача получения жидкого азота. Применение адсорбционных технологий позволяет получить продукт достаточно высокой чистоты. Регулируя количество потока, отводимого на детандер, определяется оптимальное его значение, при котором количество получаемого жидкого продукта будет максимальным. Сжижение азота с помощью представленной схемы позволяет уменьшить удельные затраты энергии на получение криогенного продукта и повысить эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова

Азот, ожижение, детандерный цикл, чистый продукт, адсорбционные технологии, криогенная техника.

На многих предприятиях, занимающихся получением технических газов — азота, кислорода, аргона, криптона, ксенона и др. при помощи воздухоразделительных установок побочным продуктом часто является газообразный азот в достаточно больших объемах. Сжижение этого газа на месте производства с предварительной очисткой при помощи мембранных или адсорбционных технологий (в зависимости от требований по чистоте) вместо выбросов в атмосферу является актуальным решением, поскольку в дальнейшем его можно повторно использовать в воздухоразделительных установках в блоках предварительного охлаждения, для накопления и продажи и многое другое [1]. Азот также интенсивно используется на предприятиях в качестве хладоносителя или одного из его компонентов.

Одним из методов получения жидкого азота является применение воздухоразделительных установок, где путем низкотемпературной ректификации воздух разделяется на компоненты: азот, кислород, аргон и другие. Их недостатком является громоздкость конструкций, а также тот факт, что для нормального протекания процесса ректификации в смеси должно содержаться достаточное количество кислорода, а для этого потребуется добавление воздуха из окружающей среды.

Получение жидкого азота с помощью адсорбционной воздухоразделительной установки и криогенной газовой машины (КГМ) также является малоприменимым в связи с тем, что КГМ работает при небольшом расходе и не в состоянии перерабатывать большие объемы газа, что говорит о ее экономической невыгодности.

Сжижать азот можно в криогенной установке, состоящей из двух каскадов, в которой имеется возможность подключения детандера с температурного уровня верхнего каскада на нижний каскад детандерного охлаждения сжатого газа. К недостаткам данного подхода является то, что его использование для сжижения азота невыгодно с точки зрения термодинамики, а значит, невыгодно и экономически [2].

После сравнительного анализа предлагается использовать техническое решение, которое заключается в получении жидкого продукта в газоожижительной установке, где газ сжимается в компрессоре, затем обратный поток, отбирая у него тепло, понижает его температуру. После этого температура азота падает за счет внешней ступени охлаждения, после которой газ проходит через два детандерных цикла (высокого и низкого давлений) и впоследствии дросселируется [3].

Анализ установки для получения жидкого азота с двумя детандерными циклами

При применении детандерного цикла высокого давления для сжижения газа, температура, при которой газ поступает в расширительную турбину, существенно ниже окружающей среды. Это приводит к снижению эффективности процесса ожижения в целом. Кроме того, использование внешней ступени охлаждения усложняет установку, требует дополнительного специального обслуживания и наличия хладагента. Это связано с тем, что температура холодильного агента постоянна, в то время как температура сжатого газа изменяется, вследствие чего возникает большая разность температур и соответственно большие необратимые потери.

Этот метод сжижения газообразного азота позволяет снизить энергозатраты на производство криогенной продукции и повысить эксплуатационные характеристики. Добиться минимальных потерь можно, используя два детандерных криогенных цикла, в которых последовательно отводится теплота от сжатого и сжиженного азота без внешней ступени охлаждения. Улучшение эксплуатационных характеристик ожижителя связано с исключением из схемы внешней ступени охлаждения паровой холодильной машины.

Положительный результат получается достичь в связи с тем, что предложенный технологический процесс, позволяет осуществить отведение теплоты от сжатого азота последовательно двумя детандерными криогенными циклами, что делает его процессом, близким к обратимому, Причем детандерный нерегенеративный цикл высокого давления реализован в диапазоне температур от температуры окружающей среды до 128 K, а детандерный регенеративный цикл низкого давления — от температуры 128 K до температуры насыщения азота при атмосферном давлении.

Использование детандерных циклов, которые являются наиболее эффективными из известных циклов в своем интервале температур при отводе теплоты от сжатого газа. позволяет уменьшить потери от необратимости при дросселировании сжатого газа до минимума и значительно снизить расход энергии на ожижение азота.

Применение упомянутых детандерных циклов, которые являются наиболее эффективными в данном температурном диапазоне, для отвода тепла от сжатого газа, позволяет значительно сократить потери, связанные с необратимостью процесса дросселирования газа. Кроме того, такое применение циклов позволяет существенно уменьшить потребление энергии на охлаждение азота по сравнению с уже существующими и известными методами.

На рисунке представлена принципиальная схема получения жидкого азота с использованием двух детандеров. Она относится к области криогенной техники и является оптимальным решением для эффективного производства сжиженного азота в крупных масштабах.

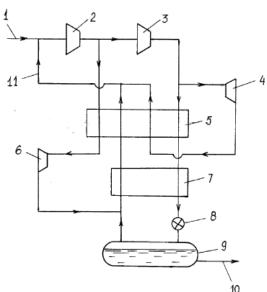


Рисунок. Принципиальная схема получения жидкого азота с детандерами

В состав схемы входят: компрессор низкого давления 2, компрессор высокого давления 3, турбодетандеры 4 и 6, теплообменные аппараты 5 и 7, дроссельный вентиль 8 и сборник жидкого азота 9. Линия 1- линия входа газообразного азота в систему, линия 10- линия выхода жидкого продукта, линия 11- линия обратного потока.

Газообразный азот в количестве 1200 м³/час входит по линии 1 в компрессор низкого давления 2, где сжимается до промежуточного давления (0,7 МПа) и после этого разделяется на два потока. Первый из них расширяется в турбодетандере 6, до давления 0,1 МПа, предварительно охладившись до 128 К в теплообменнике 5. Вследствие этого температура азота уменьшается до температуры, близкой к температуре насыщения при атмосферном давлении. Затем эта часть газа обратным потоком поступает в теплообменник 7 для охлаждения прямого потока сжатого азота высокого давления.

Оставшаяся часть дополнительно сжимается в компрессоре высокого давления 3 до 50 МПа. Затем поток снова делится на 2 части. Первая из них при температуре окружающей среды поступает на расширение в турбодетандер 4, за счет которой получается холод, а затем поступает в теплообменник 5 чтобы отводить теплоту от азота высокого давления. Азот в турбодетандере 4 также расширяется до давления 0,1 МПа, а его температура снижается до 128 К.

Другая часть азота высокого давления охлаждается последовательно в теплообменнике 5 детандерными потоками и теплообменнике 7. После этого давление охлажденного газообразного азота сбрасывается в дроссельном вентиле 8 до 0.1 Мпа. В итоге в сборнике 9 собирается парожидкостная смесь, откуда жидкость отводится по линии 10 (до 300 л/час), а пары смешиваются с потоком после турбодетандера 6 и поступают в теплообменник 7 для охлаждения прямого потока газа высокого давления, затем в теплообменник 5 и далее по линии 11 вновь возвращаются на сжатие, смешиваясь с поступающим газообразным азотом.

Представленное техническое решение позволяет убрать существующие недостатки в схемах сжижения азота в больших количествах без использования дополнительных энергетических затрат. Также уменьшается трудоемкость при работе с ожижительной установки.

Анализ показателей установки, выполненной в соответствии с представленной схемой, показывает возможность получения жидкого азота в достаточно больших количествах. Используя в цикле две детандерные ступени и работая при давлении 5 МПа, удается достичь величины коэффициента ожижения порядка 0,2. При таких параметрах цикла и расходе поступающего газа 1200 м³/час, можно получать до 300 л/час жидкого продукта. После проведение оптимизации схемы возможно улучшение ее показателей.

Исключение из схемы ступени внешнего предварительного охлаждения значительно упрощает обслуживание установки, а также сокращается количество затрачиваемой энергии.

Список использованных источников

- 1. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы: в 2 т. 3-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1996. 289 с.
- 2. Архаров А.М., Марфенина И.В., Микулин Е.И. Криогенные системы: в 2 т. 2-е изд. перераб. и доп. М.: Машиностроение, 1987. 462 с.
- 3. Усюкин И.Р. Установки, машины и аппарат криогенной техники. М.: Легкая и пищевая промышленность, 1982. 295 с.

УДК 621.565.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ХОЛОДА

Короленко М.В.¹ (аспирант), **Тамаров В.В.**¹ (магистрант) **Научный руководитель - профессор, д.т.н. Бараненко А.В.**¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: matvey_korolenko@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 622295 «Экологически безопасные технологии энергосбережения и повышения эффективности низкотемпературных систем и преобразователей энергии».

В данной работе приведены результаты проведенной серии экспериментов с дистиллированной водой и веществом AC.00 компании CRISTOPIA, которые выступают в качестве теплоаккумулирующих веществ. Был рассмотрен процесс теплообмена при фазовом переходе твердое тело-жидкость в сферических контейнерах.

Ключевые слова

Аккумулирование холода, фазовый переход, дистиллированная вода, теплоаккумулирующее вещества, теплообмен, вещества с фазовым переходом, системы кондиционирования воздуха (СКВ).

В современном мире проблема роста энергопотребления, приводящая к увеличению расхода углеводородов и негативной нагрузки на среду обитания, становится все более острой. Это относится и к холодильному сектору, где важную роль играют системы кондиционирования воздуха (СКВ).

Из-за увеличения численности населения и роста уровня жизни в мире к 2050 году спрос на энергию в этом секторе значительно возрастет [1, 2], что ведет к увеличению выбросов парниковых газов в атмосферу. В связи с этим, повышение энергоэффективности систем охлаждения является актуальнейшей задачей.

Один из способов ее решения - использование технологии аккумулирования холода, которая обеспечивает экономию энергоресурсов при переменной нагрузке потребителей в разные временные периоды и позволяет устанавливать оборудование меньшей мощности [1, 3].

В процессах аккумулирования холода ключевую роль играют фазовые переходы веществ. В статьях [4–6] авторы исследовали различные материалы, способные накапливать холод через фазовые переходы, и их применимость для эффективного хранения холода. Отмечено, что к одному из перспективных веществ для этой цели относится вода. Она обладает благоприятными теплофизическими свойствами, экологически безопасна, доступна. При использовании воды в аккумуляторах в качестве вещества с фазовым переходом будет высокой объемная плотность хранения холода, что связано с относительно большой величиной удельной теплоты плавления водного льда.

В работе авторов [7] было изучено влияние размеров сферического контейнера из нержавеющей стали и температурного напора на характеристики фазового перехода дистиллированная вода — лед. Проводились эксперименты с использованием сферических контейнеров из нержавеющей стали трех различных размеров. Данные контейнеры были заполнены дистиллированной водой на 90% и выдерживались при различных температурах. В ходе испытаний было выявлено, что размер капсул оказывает значительное влияние на процесс затвердения, что имеет значение для эффективности систем накопления тепловой энергии.

Большой объем исследований в области аккумулирования холода и их результаты свидетельствуют о значительном потенциале этой технологии для повышения

энергоэффективности холодильных систем. Прогрессивным направлением в этой области является применение веществ с фазовым переходом (ВФП). Дальнейшие исследования свойств перспективных веществ, процессов теплообмена при фазовых переходах позволят создать более эффективные и экологически чистые решения для хранения и использования холода.

Главной задачей данной исследовательской работы является создание эффективных аккумуляторов холодов для СКВ. Для этого были проведены эксперименты с получением данных о теплообмене при фазовом переходе твердое тело-жидкость в сферических контейнерах для ряда теплоаккумулирующих веществ, которые перспективны для использования в аккумуляторах холода для СКВ – дистиллированная вода и вещество АС.00 компании CRISTOPIA.

Перед проведением серии экспериментов, был проведен анализ свой ВФП по данных из открытых источников [8, 9] и измерениям ИТМО. Составлена сравнительная таблица, представленная ниже.

Характеристики исследуемых веществ

Таблица

			<u></u>			
T	Температура	Удельная	Удельная теплоемкость		Теплопроводность	
1 ип вещества	Тип фазового перехода перехода	теплота плавления	Твердая фаза	Жидкая фаза	Жидкая фаза	Твердая фаза
	°C	кДж/кг	Дж/(кг К)		Вт/(м К)	
AC.00*	0	285	2520	3500	0,615	-
H ₂ O	0	334	2100	4200	0,607	2,22

^{*}Измерения ИТМО

Представленные в таблице теплофизические свойства свидетельствуют о том, что характеристики дистиллированной воды не хуже вещества AC.00 фирмы CRISTOPIA и о перспективности применения воды в качестве ВФП.

Эксперименты были выполнены на стенде. Он спроектирован так, чтобы можно было регулировать поток теплоносителя в двух контурах: один контур используется вместе с холодильной машиной для «зарядки» аккумуляторов и перевода жидкости в твердое состояние, а другой контур используется с ТЭНом для достижения исследуемых условий работы. После чего идет изучение процесса «разрядки» и перевода твердого вещества в жидкое состояние в процессе охлаждения теплоносителя. Оба данных контура не могут работать одновременно.

Во время процесса превращения твердого вещества в жидкое фиксировали параметры процесса, к которым относятся температуры теплоносителя в 4 точках, объем теплоносителя в системе и его расход. Замер температур осуществляли через равные промежутки времени. На рисунке 1 представлена схема экспериментального стенда.

Экспериментальный стенд состоит из: 1 — изолированная ёмкость для размещения сферических контейнеров с ВФП; 2 — регулирующий клапан; 3 — циркуляционный насос; 4 — счетчик-расходомер; 5 — шаровый кран; 6 - ёмкость для испарителя холодильной машины; 7 — испаритель; 8 — трубопровод с хладагентом; 9 — холодильная машина; 10 — трубчатый электронагреватель; 11 — ёмкость для нагретой воды; 12 — сферические контейнеры с исследуемыми веществами с фазовым переходом.

В ходе экспериментов проведены 2 серии опытов, при одинаковых условиях работы, с дистиллированной водой и органическим веществом AC.00, расположенных в стеклянных сферических контейнерах. В результате получены экспериментальные зависимости изменения плотности теплового потока от времени с промежутком измерении температуры в четыре минуты. При обработке результатов измерений также учтен теплоприток от окружающей среды. Данные зависимости представлены на рисунках 2 и 3.

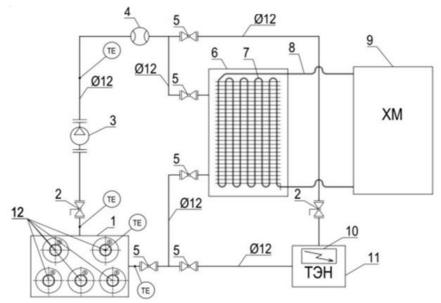


Рис. 1. Схема экспериментального стенда

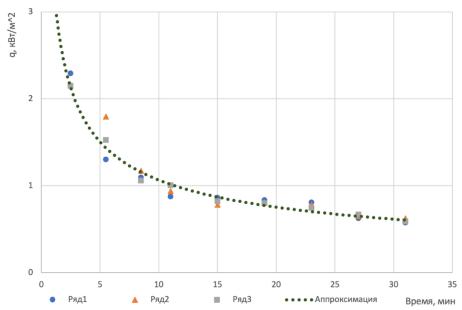


Рис. 2. Эксперименты с дистиллированной водой

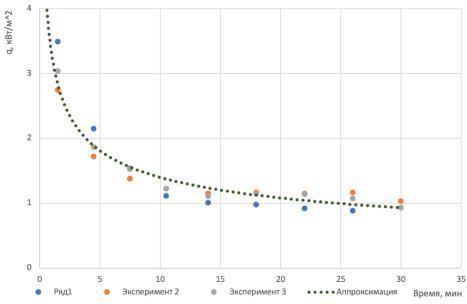


Рис. 3. Эксперименты с веществом Cristopia

- После проведения серии экспериментов можно сделать следующие выводы:
- 1. Исходя из полученных экспериментальных данных дистиллированная вода несколько уступает AC.00 по интенсивности теплообмена при фазовом переходе твердое тело жидкость, при условиях осуществления экспериментов.
- 2. С учетом более высокой удельной теплоты плавления водного льда, доступности и дешевизны дистиллированной воды она перспективна для применения в аккумуляторах холода контейнерного типа.
- 3. С целью создания надежной методики расчетов аккумуляторов холода исследования целесообразно продолжить, используя разные виды контейнеров, по размеру и форме.

Список использованных источников:

- 1. Mselle B.D., Zsembinszki G., Borri E., Verez D., Cabeza L.F. Trends and future perspectives on the integration of phase change materials in heat exchangers. // Journal of Energy Storage. 2021. Vol. 38. DOI:10.1016/j.est.2021.102544.
- 2. Cabeza L.F., Urge-Vorsatz D., McNeil M.A., Barreneche C., Serrano S. Investigating greenhouse challenge from growing trends of electricity consumption through home appliances in buildings. // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2014. Vol. 36. Pp. 188–193.
- 3. Solaimalai Raja Rakkappan, Suresh Sivan, Hongwei Wu, L. Srinivasan, Thejeshwar Karthikeyan, Experimental investigation on eliminating supercooling nature of ice and improving its energy storage performance to establish an energy-efficient cold thermal storage // Thermal Science and Engineering Progress. 2023. Vol. 44. DOI:10.1016/j.tsep.2023.102059.
- 4. Veerakumar C., Sreekumar A. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications // A review, International journal of refrigeration. − 2016. − №. 67. − Pp. 271–289.
- 5. Ashok Kumar K., Gowda K. Recent advances in applications of phase change materials in cold storage A Revie, Materialstoday: Proceedings. 2021. Vol. 47. Pp. 2410–2414
- 6. Jose Pereira da Cunha, Philip Eames, Thermal energy storage for low and medium temperature applications using phase change materials − A review. // Applied Energy. − 2016. − №. 177. − Pp. 227–238.
- 7. Chandrasekaran P., Cheralathan M., Velraj R. Influence of the size of spherical capsule on solidification characteristics of DI (deionized water) water for a cool thermal energy storage system An experimental study. // Energy. 2015. V. 90. Pp. 807–813.
- 8. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. М.: МЭИ. 1999. 168 с.
- 9. Cristopia energy system brochure. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.cdlweb.info/wp-content/uploads/2021/02/cristopia-brochure.pdf (точка доступа 12.03.2024).

УДК 665.725

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА СПГ НА КРУПНОТОННАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ

Игнатьев С.П.¹ (студент), **Третьякова В.П.**¹ (студент). Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор Баранов А.Ю.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: semen.ignatev.99@mail.ru

В статье рассматриваются перспективы развития технологии сжижения природного газа в Российской Федерации, а именно преимущества реализации патента компании ОАО «Газпром» от 2015 года и, в рамках импортозамещения, использование программного обеспечения для моделирования технологических процессов различных химических производств. Было произведено моделирование с помощью программного продукта "МиР ПиА Процесс+".

Ключевые слова

Сжиженный природный газ, СПГ, смешанный хладагент, Aspen Hysys, "МиР ПиА Процесс+".

Актуальность тематики работы связана с повышенной потребностью российских нефтегазовых компаний в отечественных технологиях сжижения природного газа, а также программного обеспечения для компьютерного моделирования процессов.

Так, 7 марта 2023 года заместитель председателя правительства Александр Новак провел встречу с представителями министерства промышленности и торговли $P\Phi$ и компаниями, реализующими СПГ проекты в России. На совещании были поставлены цели по наращиванию объемов сжижения природного газа.

Одной из перспективных технологий сжижения природного газа является схема, описанная в патенте RU 2 538 192 от 2015 года компании ОАО «Газпром» [1]. Данное технологическое решение (процесс сжижения GMR) ни разу не было использовано на практике с момента регистрации. К возможным причинам следует отнести:

- следствие инвестиционной политики компании разработчика (обычно СПГ проекты реализуются со значительным участием иностранных инвесторов, которые предоставляют технологию и оборудование для ее реализации);
- отсутствие подходящего отечественного оборудования;
- отсутствие опытно-промышленного образца.

Авторы патента заявляют, что результатом изобретения является снижение энергетических затрат, но в патенте не приводятся данные, обосновывающие это.

Установка, запатентованная ОАО «Газпром», базируется на применении двух ступеней охлаждения, сырьевой поток в качестве рабочего вещества не применяется.

Ступень предварительного охлаждения в качестве рабочего вещества задействует смешанный хладагент, состоящий из метана, этана, пропана, бутана, пентана и азота. Газообразный азот является рабочим веществом низкотемпературной ступени, в этом же контуре применяется турбодетандерный агрегат. Использования смешанного хладагента обеспечивает гибкость регулирования тепловых нагрузок.

Опыт эксплуатации других установок по сжижению природного газа показывает, что детандерная ступень на заключительном этапе сжижения снижает потери товарного газа при условии снижения давления потока сырья перед подачей в резервуары хранения [2]. Тем не менее, за счет этого энергозатраты установки сжижения не снижаются.

Хочется отметить, что использование трубчатых многопоточных или спиральных витых теплообменников позволяет предусмотреть на стадии проектирования равное распределение

мощностей между компрессорами хладагента ступени предварительного охлаждения и доохлаждения.

Помимо этого, стоит рассмотреть вариант дожатия природного газа перед установкой сжижения с целью снижения нагрузки на холодильный контур, тем самым предусмотреть возможность использования газотурбинных установок отечественного производства мощностью 25 и 32 МВт.

Для работы над собственными схемными решениями, анализа энергетической эффективности и модернизации существующих наработок требуется создание, разработка и постоянное совершенствование программ для моделирования технологических процессов. В настоящее время программный продукт Aspen Hysys от компании Aspen недоступен для лицензионного использования из-за санкций, компания прервала сотрудничество с российскими партнерами из-за отсутствия возможности оплаты лицензий. С целью импортозамещения зарубежных программных продуктов и укрепления технологического суверенитета страны, российские компании занимаются созданием программных продуктов для замещения иностранных разработок.

Одним из привлекательных на сегодняшний день решений считается программный пакет "МиР ПиА Процесс+" [3]. Это программный продукт, позволяющий создавать и модифицировать модели основных технологических процессов нефтегазовой и химической промышленности (процессов промысловой подготовки и переработки нефти, газового конденсата, попутного и природного газа). Продукт включен в Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных.

С ее помощью специалист может выбрать оптимальную схему и технологический режим производства, оценить качество продукции и ее соответствие действующим стандартам, получить исходные данные для подбора оборудования, прогнозировать затраты тепла и энергии, составить материальный и тепловой балансы производства.

Для анализа и оценки возможностей программного продукта "МиР ПиА Процесс+" в области проектирования и моделирования технологических процессов подготовки углеводородного сырья использовалась модель осушки природного газа гликолями (представлено на рисунке). Осушка природного газа используется во многих технологических процессах, в том числе и в подготовке газа к сжижению.

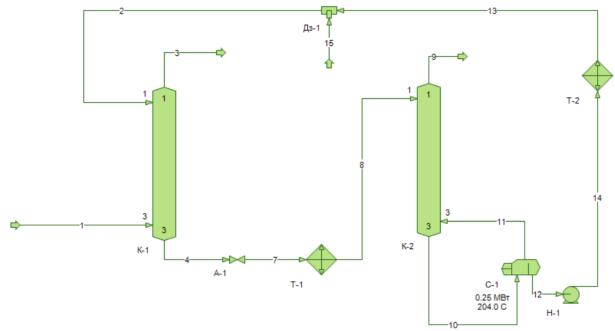


Рисунок. Схема процесса абсорбционной осушки газа

На установке осушки и регенерации природного газа осуществляется осушка газа раствором абсорбента, а также регенерация насыщенного раствора в атмосферной колонне.

Товарной продукцией установки осушки и регенерации природного газа является осушенный газ (далее – газ).

Подготовка газа на установке осушки и регенерации природного газа производится в соответствии с требованиями СТО Газпром 089-2010.

В ходе тестирования были получены результаты, близкие по значениям к результатам в продукте HYSYS.

Результаты расчета в двух программных продуктах приведены в таблице.

Таблица

Результаты моделирования

N₂	Гезультаты модел Параметр	Ед. изм	МиР ПиА	Aspen
				Hysys
1	Давление газа на выходе	МПа	5,0	5,0
2	Температура газа на выходе	°C	13,4	13,2
3	ТТР по воде	°C	-20,6	-24,8
4	Расход гликоля	кг/час	2992,3	3016,0
	Компонентный состав насыщенного раствора (HP) поток 4	%масс		
	Метан		0,144028	0,151276
	Этан		0,084880	0,072509
	Пропан		0,060728	0,089762
	Бутан		0,002824	0,017470
	Изобутан		0,001412	0,098733
_ [Пентан		0,000166	0,003377
5	Изопентан		0,002732	0,410239
	Гексан		0,000017	0,000971
	Гелий		0,000015	0,000001
	Азот		0,112309	0,005093
	Кислород		0,000261	0,000042
	Диоксид углерода		0,043088	0,054252
	Вода		3,879408	4,308213
	Триэтиленгликоль		95,668132	94,788063
	Компонентный состав регенерированного раствора (PP) поток 2	%масс		
	Метан		0,000000	0,000000
	Этан		0,000000	0,000000
	Пропан		0,000000	0,000000
	Бутан		0,000000	0,000000
6	Изобутан		0,000000	0,000000
	Пентан		0,000000	0,000000
	Азот		0,000000	0,000000
	Кислород		0,000000	0,000000
	Диоксид углерода		0,000000	0,000000
	Вода		1,169485	1,623032
	Триэтиленгликоль		98,830515	98,376968
7	Метод расчета термодинамических свойств		Гликоль	Гликоль

В наши дни отечественные компании столкнулись с непростыми условиями для ведения бизнеса. Запрет на использование иностранного программного обеспечения, проблемы с экспортом углеводородов, отсутствие опыта реализации схемных решений технологических процессов купнотоннажного сжижения природного газа на практике. Все это говорит о том, что важно незамедлительно начинать работу по повышению уровня суверенитета нашей страны.

Программный продукт "МиР ПиА Процесс+" достойно показывает себя при тестировании. Он достаточно гибкий, имеет различные методики ведения расчетов, а также понятный и интуитивный интерфейс. Для работы в нем требуется обучение, но разработчики активно способствуют этому и стремятся к развитию программы. Для решения возникших проблем требуется активное изучение отечественных программ для моделирования технологических процессов и внедрение их в работу компаний на замену недоступных зарубежных.

Список использованных источников

- 1. Пат. RU 2 538 192, МПК F25J 1/00 (2006.01). Способ сжижения природного газа и установка для его осуществления // Мамаев А.В. (RU), Сиротин С.А. (RU), Копша Д.П. (RU) и др.; заявитель и патентообладатель ОАО «Газпром» (RU). No. 2013149401/06, заявл. 07.11.13; опубл. 10.01.2015. 10 с.
- 2. Баранов А.Ю., Соколова Е.В., Иванов Л.В., Иконникова А.Ю. Перспективы развития технологий СПГ в Российской Федерации // Вестник МАХ 2023. № 1. С. 23–34.
- 3. МиР ПиА. Моделирование и расчет процессов и аппаратов. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://mirpia.ru (дата обращения 15.01.2024).

УДК 621.515

ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ДЛЯ СИСТЕМ ЕГО СЖИЖЕНИЯ

Фатеева Е.С. (аспирант), Соколов М.И. (аспирант) Научный руководитель — доцент Кожухов Ю.В. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: ekaterina.s.fateeva@gmail.com

В работе приведены основные технологии повышения эффективности нефтедобычи, ограничения их применимости. Рассмотрен центробежный компрессор в составе установки сжижения диоксида углерода, используемой для повышения нефтеотдачи скважин. По результатам аналитического расчета создана модель ступени центробежного компрессора. Представлены удовлетворительные результаты численного исследования ступени.

Ключевые слова

Центробежный компрессор, диоксид углерода, расчетная модель, численное исследование, давление.

В настоящее время потребность в энергии продолжает стремительно расти по всему миру. Одними из основных источников энергии неизменно являются нефтепродукты. Нефтепродукты, кроме использования в сфере производства топлива и получения энергии, широко используются в других сферах: машиностроение (пример: крупные детали машин из пластика), легкая промышленность (различные полимеры: полиэтилен, полипропилен, полистирол, поливинилхлорид), косметология, производство лекарств, даже продуктов питания.

Одной из существенных проблем в области нефтедобычи является снижение нефтеотдачи пластов. Для успешной разработки месторождений нефти целесообразно обратиться к методам повышения нефтеотдачи пластов.

Основные виды технологий повышения нефтеотдачи пласта [1]:

- 1. Тепловые (паротепловое воздействие, внутрипластовое давление и т. д.).
- 2. Газовые (закачка воздуха, углеводородных газов, диоксида углерода (далее CO₂), другие газы).
- 3. Химические (вытеснение нефти водными растворами ПАВ, полимеров, щелочными растворами, микробиологическое воздействие).
- 4. Гидродинамические (заводнение, форсированный отбор жидкости т. д.).
- 5. Волновые (вибросейсмические, электромагнитные, акустические).
- 6. Комбинированные.
 - Некоторые технологии могут быть ограничены параметрами скважин:
- 1. Глубина: целесообразно работать со скважинами глубиной до 1000 м при использовании закачки пара (относительно низкие пластовые давления, относительно низкие потери теплоты) и глубиной до 1500 м при использовании внутрипластового горения.
- 2. Тип скважин: при вытеснении нефтепродуктов паром (паротепловое воздействие) из песчаных пластов возникает вынос песка, при работе с глинистыми пластами возможно снижение проницаемости.
- 3. Параметры пласта: при проницаемости менее 0,2 мкм не целесообразно использование полимерного заводнения: размеры молекул полимера превышают размеры пор, что может привести к засорению призабойной зоны. При повышенной концентрации солей кальция и магния водные растворы полиакриламида становятся неустойчивыми и их структура нарушается.

- 4. Параметры добываемой нефти: если пластовая нефть обладает малым индексом кислотности (отношение содержания гидроокиси калия к массе нефти) менее 0,5 мг/г, щелочное заводнение неприменимо.
 - Особенности и недостатки технологий [2]:
- паротепловое воздействие требования к качеству воды для парогенератора, необходимость обработки воды химическими реагентами;
- пароциклическое воздействие периодическое нагревание и охлаждение обсадной колонны вызывает разрушения цементного камня, разрушение колонны в резьбовых соединениях;
- внутрипластовое горение необходимость бурения нагнетательных скважин дублеров для раздельной подачи воздуха и воды. Может привести к изменению свойств пласта при неравномерном выгорании;
- закачка воздуха низкая плотность, низкие темпы восстановления пластового давления и невозможность предотвращения его снижения при закачке газа; прорывы газа, в том числе непрореагировавшего кислорода, к добывающим скважинам;
- закачка водных растворов ПАВ большая адсорбция ПАВ из водного раствора на поверхности породы, необходимость компенсации путем закачки больших объёмов раствора;
- волновые методы относительно сложные механизмы воздействия на пласты, генерация продольных и поперечных волны.

При закачке в пласт жидкий CO_2 хорошо растворяется в нефти — уменьшение вязкости нефти, повышение эффективности вытеснения нефти (повышение нефтеотдачи), растворяется в пластовой воде — повышение вязкости воды, снижение подвижности воды относительно нефти. Закачанный в пласт CO_2 также может растворять в себе нефть и воду, извлекать легкие углеводороды, обогащаться ими. Возможное ограничение — удаленность от источника CO_2 от месторождения, жидкий CO_2 транспортируется в специальных емкостях на различном транспорте.

Закачка CO_2 в нефтяные пласты является экономически выгодным способом утилизации и хранения CO_2 , улавливаемого из отработавших газов на производстве. Таким образом, применение CO_2 для вытеснения нефти из пластов позволяет не только повысить нефтеотдачу пласта относительно дешевым и технически простым методом, но и частично уменьшить количество выбросов CO_2 в атмосферу.

Объект исследования – центробежный компрессор (ЦК) для CO₂ в составе установки сжижения диоксида углерода для закачки в нефтяной пласт.

Задача данного этапа научной работы — исследование ступени центробежного компрессора диоксида углерода, построенной по геометрическим параметрам, полученным в предыдущих этапах исследования.

В предыдущих этапах был проведен аналитический расчет проточной части центробежного компрессора. Был получен ряд геометрических параметров компрессора: конструкция многоступенчатая, 3 секции, между секциями 1 и 2, и 2 и 3 предусмотрено охлаждение потока газа. Рабочие колеса ЦК радиальные, закрытого типа с покрывным диском, выходной угол установки лопаток $\beta_{n2} = 45^{\circ}$. Также получены параметры работы компрессора и параметры газа по секциям. Эскиз промежуточной ступени многоступенчатого ЦК с лопаточным диффузором представлен на рисунке 1.

Исследуемая ступень включает рабочее колесо (РК), безлопаточный диффузор (БЛД), поворотное колено (ПК), обратно-направляющий аппарат (ОНА).

Для проведения численного исследования была использована программа ANSYS. В модуле «Geometry» был создан меридиональный обвод ступени по размерам, представленным в таблице 1.

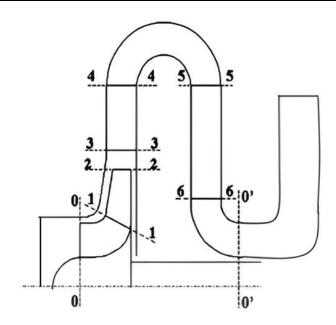


Рис. 1. Эскиз промежуточной ступени многоступенчатого ЦК с обозначением контрольных сечений: 0-0, 1-1, 2-2, 3-3, 4-4, 5-5, 6-6, 0'-0' [3]

Размеры проточной части первой ступени ЦК

Таблица 1

Параметр	Обозначение параметра	Ед.	Значение
R_0	Радиус входа в РК	M	0,126
R_1	Радиус входа на лопаточную решетку РК	M	0,128
b_1	Ширина канала на входе в РК	M	0,032
R_2	Радиус выхода с РК	M	0,178
b_2	Ширина канала на выходе из РК	M	0,019
r_{oc}	Радиус основного диска РК	M	0,037
\mathbf{r}_{π}	Радиус покрывного диска РК	M	0,015
R_3	Радиус входа в БЛД	M	0,187
b_3	Ширина канала на входе в БЛД	M	0,019
R_4	Радиус выхода из БЛД	M	0,285
b_4	Ширина канала на выходе из БЛД	M	0,019
R_s	Внутренний радиус ПК	M	0,015
R_h	Наружный радиус ПК	M	0,034
R_5	Радиус входа в ОНА	M	0,285
b ₅	Ширина канала на входе в ОНА	M	0,019
R_6	Радиус выхода в ОНА	M	0,128
b_6	Ширина канала на выходе из ОНА	M	0,016

Полученное РК включает 22 лопатки, OHA-12 лопаток. Трехмерные модели лопаток РК и OHA представлены на рисунке 2.

Далее необходимо задать направление потока в проточной части. Для некоторого упрощения проведения расчетов проточную часть целесообразно разделить на 2 части следующим образом: модель 1 – РК и БЛД, модель 2 – ПК и ОНА. Таким образом, для РК и БЛД создается функция «Flowpath», в которой задается тип машины – «Centrifugal compressor». Для ПК и ОНА в функции «Flowpath» задается тип машины – «Undefined».

Далее в модуле «Turbogrid» необходимо построить блочно-структурированную сетку для модели 1. В разделе «Mesh data» во вкладке «Mesh size» был выбран метод построения сетки: «Target Passage Mesh Size», выбрана точность сетки: «Spesify», задано количество ячеек 3 млн. Разделы с установленными параметрами сетки представлены на рисунке 3.

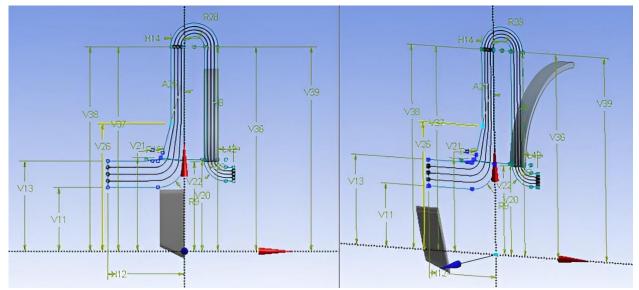


Рис. 2. Меридиональный обвод ступени ЦК и модели лопаток РК и OHA: слева – нормально к плоскости Z-X, справа – в повороте

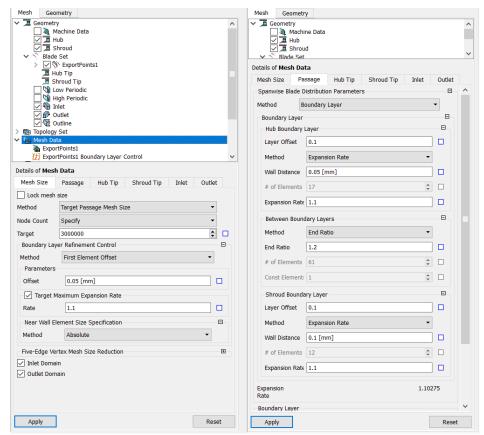


Рис. 3. Модуль «Turbogrid», функция «Mesh data», вкладки «Mesh size», «Passage». Указываются параметры: размер первого элемента, густота сетки, расстояние от стенки

Получены блочно-структурированные сетки моделей 1 и 2, включающие 4,1 млн ячеек и 3,8 млн. ячеек, соответственно. Общая модель ступени должна содержать почти 8 млн ячеек, и для работы с таким большим объемом данных требуются определенные мощности вычислительных машин. При сокращении числа ячеек и, как результат, сильном загрублении сетки могут возникнуть ошибки на этапе создания блочно-структурированной сетки и на этапе расчета. По этой причине модель была разделена выбранным образом, количество ячеек у обеих моделей приблизительно равно, при этом качество сетки удовлетворительное. Отображение сетки первой модели представлено на рисунке 4.

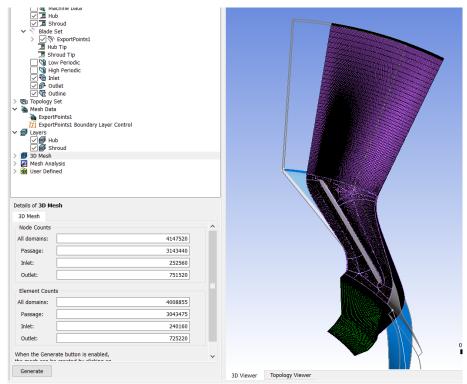


Рис. 4. Блочно-структурированная сетка на секторе (1/22) модели 1 (РК+БЛД)

При попытке построения сетки для всей неподвижной части (БЛД, ПК, ОНА) в области ПК на меньшем диаметре поворота возникает ошибка – наличие отрицательных объемов. Окно с параметрами сетки представлено на рисунке 5.

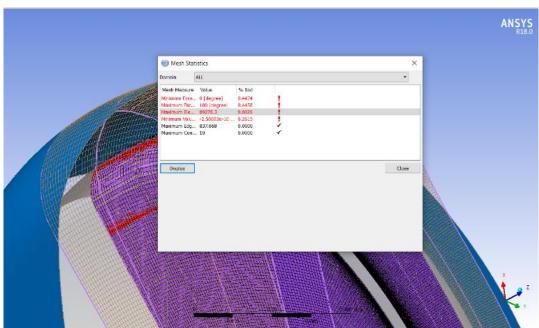


Рис. 5. Область возникновения ошибки отрицательных объемов на меньшем диаметре ПК, окно «Статистика сетки», некорректные параметры выделены красным

Увеличение количества ячеек или увеличение густоты ячеек по всей области построения (БЛД, ПК, ОНА) не позволило скорректировать сетку в достаточной мере. Был создан дополнительный слой сетки вблизи от области возникновения отрицательных объемов, что позволило решить данную проблему. Отображение блочно-структурированной сетки на ПК и дополнительного слоя сетки представлены на рисунке 6.

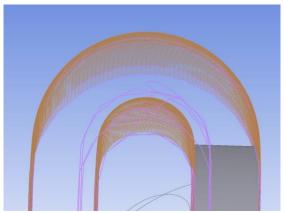


Рис. 6. Предварительный вид блочно-структурированной сетки на ПК, дополнительный слой сетки вблизи от меньшего диаметра ПК

Расчет ступени производится в модуле «CFX» ANSYS. В разделе «Setup» представлена модель РК+БЛД, которая состоит из доменов/областей: вход (Inlet), рабочее колесо (Passage), выход (Outlet). Расчетная модель представлена на рисунке 7 (а, б, в).

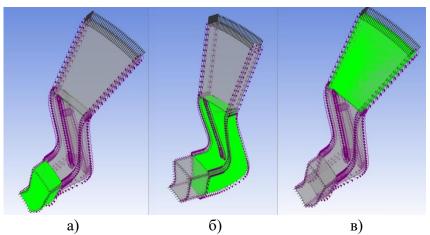


Рис. 7. Расчетная модель РК+БЛД с выделенными доменами, слева направо: «Inlet», «Passage», «Outlet»: а) входной участок, б) рабочее колесо, в) безлопаточный диффузор

Для проведения испытаний машин, работающих на средах, отличных от воздуха, целесообразно обратиться к критериям подобия [4]. Для численного исследования спроектированной ступени, работающей на реальном газе, могут быть проведены при работе на воздухе только в том случае, когда показатели адиабаты сжимаемых газов равны или близки 1,4. Показатель адиабаты для диоксида углерода — 1,277, для воздуха — 1,4, разница составляет 8,7%, что может быть приемлемо для применения методов подобия.

Таким образом, по [4] число оборотов $n_{_{M}}$ (модели) и начальное давление $p_{_{HM}}$ (модели) при испытаниях на воздухе должны удовлетворять соотношениям (здесь нижний индекс м – отнесение к модели):

$$n_{_M} = n\sqrt{R_{_M}T_{_{HM}}/RT_{_H}} ,$$

$$p_{_{HM}} = p_{_H}\mu_{_{HM}}/\mu_{_H}\sqrt{R_{_M}T_{_{HM}}/RT_{_H}} .$$

Таким образом, будет получено значение эквивалентной частоты оборотов ротора ступени и начального давления, при которой исходная ступень для диоксида углерода, но работающая на воздухе, будет иметь те же характеристики, как и ступень, работающая на диоксиде углерода на заданном режиме.

Граничные условия для проведения испытаний на воздухе представлены в таблице 2.

Таблица 2

Граничные условия для проведения испытаний на воздухе

Область	Параметр	Ед. изм.	Значение
Inlet	Полное давление	МПа	2,095
Illiet	Полная температура	К	302,97
Passage	Частота вращения ротора	Об/мин	9553
Outlet	Массовый расход	кг/с	21,833

После установки граничных условий для каждой области и задания условий расчета следующим этапом является запуск расчета в разделе «Solution».

Список использованных источников

- 1. Рузин Л.М., Морозюк Л.М. Методы повышения нефтеотдачи пластов (теория и практика): учеб. пособие Ухта: УГТУ, 2014. 127 с.
- 2. Ильина Г.Ф., Алтунина Л.К. Методы и технологии повышения нефтеотдачи для коллекторов Западной Сибири: учеб. пособие— Томск: Изд-во ТПУ, 2006. 166 с.
- 3. Кожухов Ю.В., Карташов С.В., Аксенов А.А., Яблоков А.М., Соколов М.И., Садовский Н.И., Зайцева Е.С. Методика построения расчетных сеток лопаточных аппаратов энергетических турбомашин для моделирования вязкого потока: учеб. пособие. СПб.: ПОЛИТЕХ-ПРЕСС, 2020. 98 с.
- 4. Рис В.Ф. Центробежные компрессорные машины. М-Л.: Машиностроение, 1964. 336 с.

УДК 66.021.3

ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ

Хмельницкая Д.В. (магистрант) Научный руководитель – к.т.н., доцент Зайцев А.В. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: dasha hmel01@mail.ru

В статье рассмотрены виды колонных аппаратов, используемые в нефтегазовой отрасли, их применение и особенности в зависимости от типа аппарата. Проанализированы внутренние контактные устройства колонн, виды орошения. В качестве примера рассмотрено эффективность разного вида орошения ректификационных колонн процесса стабилизации газового конденсата. Моделирование ректификационных колонн осуществлено в программе Aspen HYSYS.

Ключевые слова

Колонные аппараты, ректификационные колонны, внутренние контактные устройства, ребойлер, конденсатор, массообменные процессы.

В процессах ректификации и абсорбции для контактирования потоков пара и жидкости используются аппараты различных конструкций. Среди них наиболее распространены вертикальные аппараты колонного типа.

Колонные аппараты — это цилиндрические вертикальные сосуды постоянного или переменного сечения. Они оснащены внутренними тепло- и массообменными устройствами (тарелками или насадкой), а также вспомогательными узлами [1]. Эти устройства обеспечивают проведение технологического процесса, такого как ректификация, абсорбция, экстрактивная ректификация, экстракция или прямой теплообмен между паром и жидкостью. Каждая колонна служит определенной цели, работая совместно с другими для превращения сырой нефти в ряд ценных продуктов. Эффективность этих колонн напрямую влияет на качество конечной продукции, рентабельность процесса переработки.

Оптимальная конструкция аппаратов и работа в установившихся для необходимо процесса режима изучается разными авторами. В последнее время исследователи сосредоточили внимание на изучении тонкостей, связанных с динамическими аспектами, такими как динамика системы и разработка стратегий управления технологическими процессами, регулирования оборудованием для получения продукции высокого качества, а также сокращение времени на операционные затраты и снижение экономической стоимости процесса [2].

Внутреннее устройство колонны достаточно сложное. Эти устройства повышают эффективность массопереноса между паровой и жидкой фазами, что имеет решающее значение для процесса дистилляции. Одним из самых распространенных типов внутренних контактных устройств являются тарелки. Колонна разделена на несколько горизонтальных секций металлическими тарелками с определенными отверстиями, через которые пар поднимается вверх, а жидкость стекает вниз. На каждой тарелке осуществляется контакт между газовой фазой, которая поднимается вверх, и жидкостью, стекающий вниз с тарелки. Жидкость собирается на каждой тарелке до определенного уровня, по мере повышения уровня избыток жидкости стекает через перегородку на нижнюю тарелку. В результате контакта этих встречных потоков составы паровой и газовой фазы изменяются. Контактирование происходит до тех пор, пока пар наверху не приобретет заданный состав по содержанию низкокипящего компонента, а жидкость внизу не достигнет заданного состава.

Другим типом внутреннего контактного устройства является насадка. Насадки представляют собой материалы, предназначенные для обеспечения большой площади поверхности для контакта между паровой и жидкой фазами. Они могут быть изготовлены из различных материалов, включая металлы, керамику или пластик. Выбор насадочного материала зависит от таких факторов, как природа обрабатываемых жидкостей и условия эксплуатации внутри колонны. Насадки могут быть нерегулярными и регулярными. Нерегулярная насадка состоит из неупорядоченного слоя инертного материала различной формы (керамические шары, металлические элементы), а регулярная насадка состоит из слоев гофрированного материала, расположенных по определенной схеме. Оба типа обеспечивают максимальный контакт между поднимающимися парами и нисходящими жидкостями, что позволяет более эффективно разделять сырье на различные фракции.

В данной статье рассмотрено устройство и принцип работы ректификационной колонны на примере колонны стабилизации газового конденсата. Процесс стабилизации может быть осуществлен несколькими способами: стабилизация сепарацией, дегазацией, стабилизация путем фракционирования, или комбинированный процесс, совмещающий как сепарацию, так и ректификацию.

Стабилизация путем фракционирования — это сложный процесс, широко использующийся в промышленности и достаточно точный для получения жидкостей с необходимым давлением насыщенных паров [3]. Чаще всего процесс стабилизации газового конденсата направлен на удаление легких углеводородов, таких как метан, этан, пропан и бутан из газового конденсата. Конечный продукт, выходящий из нижней части колонны, состоит в основном из пентанов и более тяжелых углеводородов с небольшим количеством бутана. Фактически в процессе происходит разделение между самым легким жидким компонентом (пентаном) и самым тяжелым газом (бутаном).

Стабилизация путем фракционирования — это современная операция, экономически более привлекательная по сравнению с мгновенным испарением. Этот процесс может включать, как одну колонну, так и объединять несколько колонн для возможности получения также пропан-бутановой фракции. Применение комбинированного процесса позволяет увеличить гибкость процесса, уменьшить энергетические затраты.

Нестабильный конденсат, предварительно нагретый в теплообменнике поступает в ректификационную колонну, где сразу происходит процесс однократного испарения и более легкие компоненты с низкой температурой кипения поднимаются в верхнюю часть колонны, а жидкие компоненты с высокой температурой кипения опускаются вниз [3].

В зависимости от требуемых выходящих потоков из колонны, параметров продуктов колонны могут быть оснащены дополнительным оборудованием. Для более четкого разделения используют конденсатор, ребойлеры.

В нижней части колонны жидкость циркулирует через ребойлер, дополнительно нагреваясь в ребойлере, поддерживается температура низа колонны и также происходит отделение легких компонентов из кубового остатка.

Ребойлеры представляют собой паровой змеевик в нижней части колонны или выносной теплообменный аппарат с паровым пространством, где нижний продукт колонны частично испаряется за счет тепла от парового змеевика. Горячая парогазовая смесь направляется обратно в колонну, что обеспечивает дополнительный подвод теплоты для работы ректификационной колонны. Ребойлеры повышают эффективность фракционирования, но также расходуется большое количество энергии на подачу пара для нагрева кубового продукта и затем на охлаждение образующегося конденсата, тепло которого чаще всего не используется.

Моделирование ректификационной колонны стабилизации газа осуществлено в среде моделирования Aspen HYSYS. Для анализа выбраны три модели колонны: "Рефлюкс Абсорбера", "Ребойлер Абсорбера", "Трехфазная дистилляция" [4]. Технологические параметры сырья колонны: избыточное давление - 1,6 МПа, температура 16°С. Колонна состоит из 21 тарелки (ступени разделения), сырье подается на 10 тарелку (рис. 1).

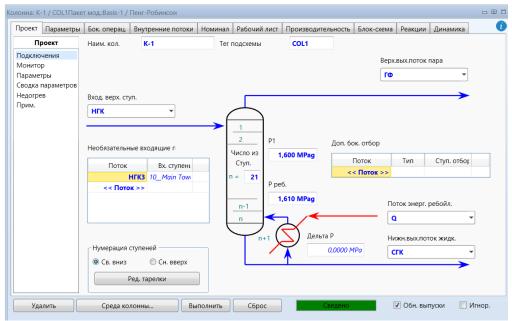


Рис. 1. Страница профиля колонны

На вкладке "монитор" для расчета необходимо задать спецификации, как обязательные, так и те, данные которых необходимы для изучения. Так, задав спецификацию "доля компонента колонны" определенного компонента на интересующей нас ступени, при расчете и изменении параметров можно следить за количеством компонентов (рис. 2).

	Указанное знач.	Текущее знач.	Вес. ошибка	Активн	Оценка	Текущий
Ovhd Prod Rate	180,0 kg/h	180,0	-0,0000	V	V	<u>~</u>
Boilup Ratio	<пусто>	25,74	<пусто>		✓	
Duty	<nycmo></nycmo>	7,784	<пусто>		▽	
n-C4 20	<nycmo></nycmo>	0,9131	<пусто>		~	
n-C4 10	<nycmo></nycmo>	0,5891	<пусто>		✓	
n-C4 1	<nycmo></nycmo>	0,4548	<пусто>		V	

Рис. 2. Спецификации колонны

Использование колонны с ребойлером позволяет получить более тяжелый нижний продукт с наименьшим количеством легких фракций за счет дополнительного отделения легких компонентов из кубовой части колонны с использованием тепла, полученного в результате нагрева в ребойлере (таблица 1).

Таблица 1 **Компонентный состав ректификационной колонны с ребойлером**

Компонент	ГФ (верхний продукт колонны)	СГК (нижний продукт колонны)
метан	0,3397	0,000
этан	0,2188	0,000
пропан	0,2256	0,0026
изо-бутан	0,0515	0,0849
н-бутан	0,1184	0,9126
изо-пентан	0,0000	0,000
другое	0,0459	0,000

Ректификационные колонны с конденсатором позволяют получить легкую газовую фазу, обогащенную метаном и этаном, жидкий продукт рефлюксной емкости, но кубовый продукт колонны в этом случае не будет таким тяжелым и обедненным легкими фракциями, как в случае с колонной с ребойлером. В таблице 2 представлен фракционный состав продуктов колонны с конденсатором.

Таблица 2

Компонентный состав ректификационной колонны с конденсатором

Компонент	Верхний продукт колонны (газовая фаза)	Верхний продукт колонны (жидкая фаза)	Нижний продукт колонны
метан	0,6318	0,1065	0,0522
этан	0,2282	0,3095	0,1430
пропан	0,0617	0,3853	0,3526
изо-бутан	0,0030	0,0556	0,1187
н-бутан	0,0038	0,1078	0,3193
изо-пентан	0,0000	0,000	0,0000
другое	0,0715	0,0353	0,0143

В ректификационной колонне с использованием и конденсатора, и испарителя получается более насыщенный тяжелым компонентом нижний продукт колонны. Также в верхнем продукте больше содержание метана и этана. За счет орошения в верхней части колонны и подвода теплоты в нижней части колонны разделение компонентов более четкое.

Таблица 3 Компонентный состав ректификационной колонны с конденсатором и ребойлером

Компонент	ГФ (верхний продукт колонны)	СГК (нижний продукт колонны)
метан	0,3508	0,0000
этан	0,2260	0,0000
пропан	0,2331	0,0002
изо-бутан	0,0523	0,0458
н-бутан	0,0904	0,9540
изо-пентан	0,0000	0,0000
другое	0,0474	0,000

Процесс ректификации является основным методом разделения смеси в процессах нефтегазовой промышленности. В зависимости от заданных условий процесса, качества сырья и требуемого качества продуктов могут использоваться колонны аппараты различного строения. В ходе моделирования процесса ректификации с разными видами регулирования температурного режима в колонне, можно заметить, как влияет использование конденсатора и ребойлера на распределение компонентов в колонне, изменение температуры по колонне, тепловую нагрузку на колонну. В зависимости от заданных условий, параметров, можно применять ту или иную модель колонного аппарата для получения требуемых характеристик как по продуктам разделения, так и по рабочим параметрам колонны, по расходу орошения.

Список использованных источников

- 1. Борзенко Е.И., Зайцев А.В. Установки и системы низкотемпературной техники. Автоматизированный расчет и моделирование процессов криогенных установок и систем. Учеб. пособие. СПб.: СПбГУНиПТ. 2006. 232 с.
- 2. Mandis M. et al. Exploring nontraditional LSTM architectures for modeling demethanizer column operations // Computers & Chemical Engineering. 2024. T. 183. P. 108591.
- 3. Speight J.G. The refinery of the future / J. G. Speight. Oxford: Elsevier. –2020. 416 p.
- 4. Кузнецов О.А. Моделирование схемы переработки природного газа в Aspen HYSYS V8 / О.А. Кузнецов. М.-Берлин: Директ-Медиа, 2015. 116 с.

УДК 621.59

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ СПГ В КРУПНОТОННАЖНОМ ЦИКЛЕ АРКТИЧЕСКИЙ КАСКАД

Шмелькова Т.В.¹ (магистрант) Научный руководитель – д.т.н., профессор Баранов А.Ю.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: bloom212@mail.ru

В статье произведен анализ отечественной крупнотоннажной технологии производства сжиженного природного газа «Арктический каскад». При разработке технологии сжижения необходимо руководствоваться мощностными возможностями, рабочими характеристиками проектируемого цикла, условиями окружающей среды, финансовой составляющей.

В работе анализируются технические и структурные особенности данной технологии сжижения Ключевые слова

СПГ, крупнотоннажное производство, ожижительный цикл, теплообменное оборудование, энергоэффективность.

Развитие производства сжиженного природного газа (СПГ) и дальнейший экспорт на зарубежные рынки является одним из многообещающих российских проектов в нефтегазовой сфере. Потенциал арктических регионов РФ позволяет рассматривать данные территории в качестве перспективной ресурсной базы для создания крупнотоннажных проектов производства СПГ.

На рисунке 1 представлен плановый график реализации арктических проектов производства СПГ на территории $P\Phi$.

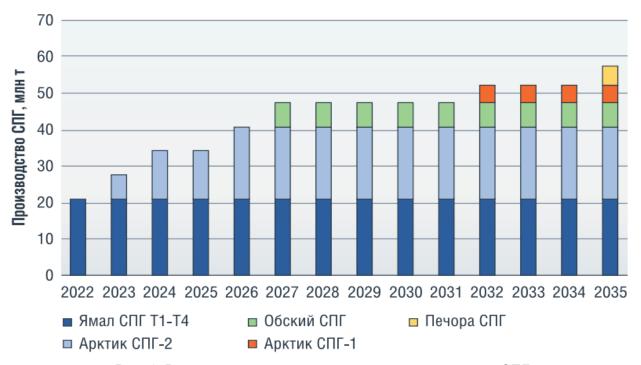


Рис. 1. Реализация арктических проектов производства СПГ

Согласно данному плану, рассчитывалось организовать производство СПГ на территории Арктики до 58 млн т в год. Тем не менее данные планы по реализации СПГ-проектов были сформированы до 2022 года, когда еще были доступны зарубежные технологии сжижения.

Также стоит рассмотреть возможные маршруты экспорта СПГ через северный морской путь (СМП) (рис. 2). С помощью СМП можно в кратчайшие сроки отправить СПГ в страны Азиатско-Тихоокеанского региона из арктических территорий $P\Phi$.

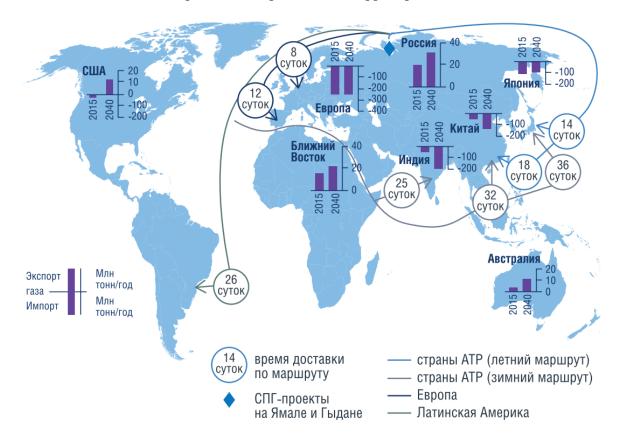


Рис. 2. Перспективные маршруты экспорта СПГ через СМП

Успешная эксплуатация СМП будет определяться наличием современной портовой инфраструктуры, а также введением в оборот ледокольного, аварийно-спасательного и вспомогательного флотов. Величина СМП хоть и составляет 5600 км, а сам он пролегает через пять морей, транспортировка СПГ в страны АТР будет занимать меньше времени, чем если бы товарный продукт отправлялся маршрутом через Суэцкий канал [5].

Для реализации СПГ-проектов на арктических территориях была разработана отечественная технология сжижения природного газа — «Арктический каскад». Данный цикл был разработан для крупнотоннажного производства СПГ. Реализация его на практике была осуществлена в рамках проекта Ямал-СПГ, в качестве одной из производственных линий процесса. По задумке разработчиков данный цикл может использовать низкую температуру окружающей среды в Арктике. Технологическая схема данного процесса представлена на рисунке 3. Природный газ (ПГ) последовательно охлаждается в теплообменнике 5, использующего тепло окружающего воздуха или воды, до +10°С, далее в этановых теплообменниках-испарителях 7, где его температура опускается до —84°С. Параллельно с ПГ через теплообменники 7 проходит поток низкотемпературного хладагента цикла, газообразного азота, который также охлаждается до уровня —84°С, а затем расширяется в детандере 10Д. Азот низкого давления в теплообменнике 9 охлаждает ПГ до температуры —137°С. После этого ПГ дросселируется и поступает в сепаратор 11, где из потока выделяется жидкая фракция, которая имеет температуру —157°С. Сжиженный природный газ отводится в накопительное хранилище.

— Природный газ — Азот — Этан
— Теплоноситель (воздух или вода)

8a 86 8B 8r

ТГ

К4 77 77 77 77 99

Рис. 3. Технологический процесс получения СПГ «Арктический каскад»: K2 – компрессор природного газа; K3 – азотный компрессор; K4 – этановый компрессор; 5 – аппарат воздушного (водяного) охлаждения; 7 (а-д) – испарители этана; 8 (а-г) – теплообменники азотного цикла; 9 – концевой теплообменник переохлаждения; 10Д – азотный детандер; 10К – компрессор, связанный с детандером; 11 – сепаратор; 12 – жидкостной насос СПГ; 15 – компрессор для сжатия паров отпарного газа; ТГ– топливный газ

CIII

Отвод теплоты конденсации от потока сырьевого природного газа обеспечивают два внешних контура охлаждения – этановый и азотный, а также дроссельная ступень, в которой в качестве рабочего вещества используется поток ПГ. Первый контур охлаждения включает в себя пять многопоточных теплообменников-испарителей 7, в которых теплота от потоков ПГ и азота отводится к кипящему в межтрубном пространстве этану. Температурный уровень отвода теплоты определяется давлением паров этана, которое в свою очередь поддерживается на разных уровнях за счет подключения линии отвода паров к разным ступеням сжатия центробежного компрессора К4. Второй контур охлаждения дополнительно содержит четыре азотных теплообменника 8, в которых теплота передается от прямого потока азота к обратному, основной теплообменник азотного контура 9, в котором реализуется холодопроизводительность, созданная за счет работы компрессора КЗ и детандера 10Д. Тепловая нагрузка на теплообменник 9 формируется за счет охлаждения потока ПГ, часть этой нагрузки компенсируется за счет перегрева паров СПГ, которые проходят через межтрубное пространство теплообменника [2].

Несмотря на большое внимание средств массовой информации к реализации первой отечественной технологии крупнотоннажного сжижения природного газа, коммерческого признания данный цикл не получил. «Арктический каскад» был реализован с производительностью 0,9 млн тонн в год, причем запуск крупнотоннажного цикла затянулся по эксплуатационным причинам. Рассмотрим проблемы, которые возникли при эксплуатации технологии.

В цикле «Арктический каскад» привод всех компрессоров обеспечивается единой газотурбинной установкой, кинематическая схема которой представлена на рисунке 4.

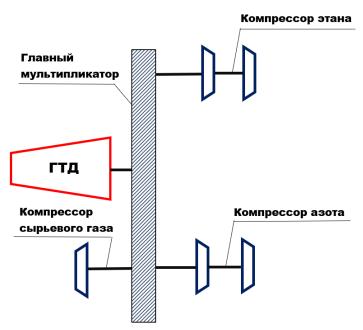


Рис. 4. Газотурбинная установка

При помощи мультипликатора механическая энергия, вырабатываемая газотурбинной установкой, перераспределяется между тремя компрессорными агрегатами. Бесспорными преимуществами данного решения являются сокращение затрат, поскольку из эксплуатации исключаются дорогостоящие электрогенераторы и электродвигатели, единая маслосистема и широкий диапазон регулирования по оборотам. С другой стороны, сложная кинематическая схема требует использования крупногабаритных мультипликаторов, которые неизбежно создают потери механической энергии. В условиях, когда механически связаны все агрегаты, возрастает вероятность ошибок регулирования, так как при необходимости изменения работы одного компрессора — меняется производительность всех агрегатов. Целесообразно иметь индивидуальный привод для каждого компрессора [1].

Особенностью данной технологии сжижения является наличие этановой ступени предварительного охлаждения взамен пропановой, которая использована в технологии СЗМR, реализованной на первых технологических линях проекта Ямал СПГ. Опыт эксплуатации цикла СЗМR в климатических условиях Арктики показал, что при низкой температуре окружающей среды, существенно снижается давление конденсации пропана, что приводит к уменьшению тепловой нагрузки отводимой системой предварительного охлаждения. Предполагалось, что использование чистого этана в высокотемпературных ступенях охлаждения, позволит в полной мере использовать низкую температуру окружающей среды для эффективного отвода тепловой нагрузки.

Разработчики цикла предполагают, что, используя для отвода теплоты воздух из окружающей среды или морскую воду в заполярье, можно охлаждать $\Pi\Gamma$ до температуры $+10^{\circ}$ C. Такие расчеты вызывают сомнения с учетом сведений о климате в поселке Сабетта (рис. 5), где осуществляется эксплуатация цикла «Арктический каскад».

Для того, чтобы на выходе из концевого холодильника компрессорной установки КЗ (рис. 3) не превышала 10°С температура воздуха окружающей среды должна быть не выше 0°С, что не выполняется в период с мая по сентябрь. Предположение, что в летний период для охлаждения можно использовать систему водяного охлаждения не оправданно, так как для охлаждения ПГ до 10°С температура охлаждающей воды должны быть не выше 5°С, что опять же не выполнимо с апреля по октябрь. Несмотря на то, что Обская губа находится за северным полярным кругом, течение реки Обь, впадающей в данный залив, приносит с собой большое количество теплоты, аккумулированной в верхнем течении. Ежегодно в течение 5–6 месяцев условия работоспособности этанового контура охлаждения представляется сомнительной.

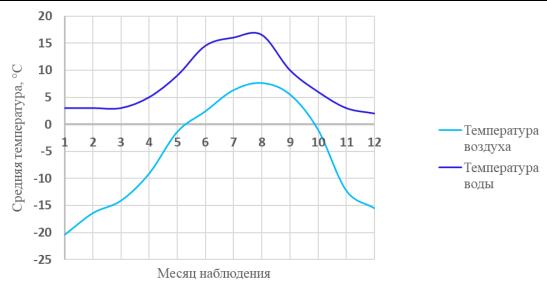


Рис. 5. График изменения температуры воды и атмосферного воздуха на побережье Обской Губы

Нерационально используется встроенный в цикл «Арктический каскад» азотный контур охлаждения, в котором в качестве дополнительного источника холодопроизводительности используется низкотемпературный детандер. Включение в цикл азотного детандера обычно используют для получения СПГ с температурой ниже температуры насыщенной жидкости, т. е. детандерная ступень охлаждения завершает процесс получения СПГ. Минимальная температура, которую можно получить с помощью азотного детандера составляет 90 К, а в цикле «Арктический каскад» детандер поддерживает температуру только 133 К [4].

Цикл завершает дроссельная ступень охлаждения, в которой в качестве рабочего вещества используется поток сырьевого природного газа. ПГ дросселируется в отделитель жидкости, далее жидкая фракция отводится в накопительную емкость, а паровая фракция отводится в систему топливного газа через теплообменник 9 (рис. 3). Степень сухости потока ПГ после дросселирования может быть достаточно велика, что приведет к поступлению в систему топливного газа избыточного количества паров СПГ.

ПАО «Новатэк» в 2023 году получил патент №2792387 на усовершенствованную технологию сжижения «Арктический Каскад модифицированный», где были упомянуты недостатки старой версии:

- многочисленное число единиц оборудования из-за сложного строения азотного контура;
- холодопроизводительность в азотном контуре обеспечивается исключительно за счет расширения в турбодетандере;
- недостаточное охлаждение ПГ перед его поступлением на дроссельное устройство;
- низкий коэффициент ожижения цикла;
- существенное количество отпарного газа.

В 2023 году разработчики цикла запатентовали модифицированный вариант прошлой версии, технологическая схема данного цикла представлена на рисунке 6.

Отсутствие азотных теплообменников, отказ от использования ПГ в качестве рабочего вещества – очевидные преимущества новой схемы по сравнению с предыдущей. По заявлениям разработчиков данный технологический процесс избавлен от недостатков классического «Арктического каскада». За счёт кипения легкого хладагента, азота, ПГ в достаточной мере охлаждается перед дросселированием, что в итоге приводит к увеличению выхода целевого продукта — СПГ, уменьшению количества побочного продукта — отпарного газа, который необходимо было дополнительно сжимать и отправлять на рецикл. Кроме того, в цикле использовано меньшее число единиц оборудования. В целом, уменьшение себестоимости производства СПГ и увеличение коэффициента ожижения цикла являются явными преимуществами данного нового технологического процесса [3].

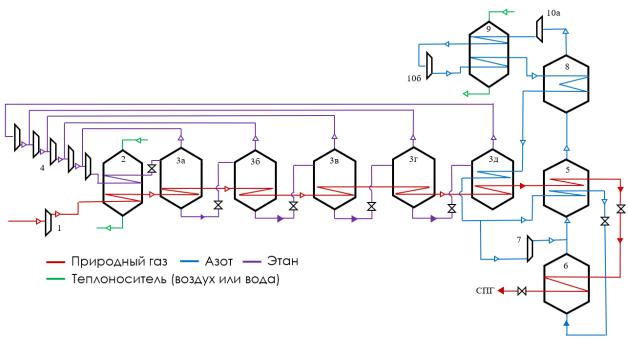


Рис. 6. Технологический процесс получения СПГ «Арктический каскад модифицированный»: 1 – компрессор природного газа; 2,9 – аппарат воздушного (водяного) охлаждения; 3 (а-д) – испарители этана; 4 – этановый компрессор; 5 – кожухотрубный теплообменник; 6 – испаритель азота; 7 – азотный детандер; 8 – двухпоточный перегреватель; 10 (а-б) – азотный компрессор

Развитие отечественных технологий сжижения остается актуальной задачей для энергетической отрасли нашей страны. Одними из основных факторов, влияющих на принятие технических решений при проектировании и строительстве заводов СПГ, являются удельная энергоэффективность технологических процессов подготовки и сжижения ПГ, металлоемкость и стоимость оборудования технологических линий. Первостепенной задачей разработчиков новых технологических решений является предварительный математический анализ циклов, моделирование процесса получения СПГ в специальном программном обеспечении. Это позволит исключить на этапе подготовки проектирования проблемы, которые возникнут при последующей эксплуатации установки.

Список использованных источников

- 1. Васин О.Е., Минигулов Р.М., Бондарук В.В. Кинематические схемы компрессоров хладагента установок по производству СПГ// Газотурбинные Технологии. 2018. С. 18—20.
- 2. Патент РФ 2 645 185, МПК F25J 1/00 (2006.01). Способ сжижения природного газа по циклу высокого давления с предохлаждением этаном и переохлаждением азотом «Арктический каскад» и установка для его осуществления / Минигулов Р.М., Руденко С.В., Васин О.Е., Грицишин Д.Н., Соболев Е.И.; заявитель и патентообладатель ПАО «НОВАТЭК», Заявка: 2017108800, 16.03.2017, опубликован 16.02.2018. Бюл. № 5.
- 3. Патент РФ 2 792 387, МПК F25J 1/00 (2006.01). Способ сжижения природного газа «Арктический каскад модифицированный» и установка для его осуществления / Руденко С.В., Федосеев П.О., Нозиков Н.Д., Трифонова, А.Г., Разяпов, Т.Э., Цепков, А.И., Седавных, Д.Н. Радаев, И.А.; заявитель и патентообладатель ПАО «НОВАТЭК», Заявка: 2022130053, 18.11.2022, опубликован 21.03.2023. Бюл. № 9.
- 4. Баранов А.Ю., Соколова Е.В., Иванов Л.В., Иконникова А.Ю. Перспективы развития технологий СПГ в Российской Федерации // Вестник Международной академии холода. -2023. -№. 1. C. 23-34.
- 5. Харченко Ю.А., Карнаухов И.Ю. Морская транспортировка газа с арктических месторождений. Перспективы развития // Neftegas.RU. 2023. Т. 134. №. 2. С. 34–37

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Химическая инженерия	
T 7	
Химическая инженерия	

УДК 66

CHARACTERIZATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF ENSET FIBER REINFORCED COMPOSITE WITH UNSATURATED POLYESTER FOR THE APPLICATION OF FALSE CEILING BOARD

Gebremaryam Y.Z.¹ (student), Atlaw M.J.¹ (student) Scientific Supervisor – Professor Uspenskaya M.V.¹

1 – ITMO University

e-mail: zyirdaw27@gmail.com

In the present work conducted the characterization of the physico-mechanical properties of Enset fiber reinforced composite with unsaturated polyester for the application false ceiling board. The consolidated Enset fiber was used as a reinforcement and unsaturated polyester resin was used as a matrix. The reinforced fiber has been used in a fabric stage and hand lay-up method of manufacturing technique was used. The result of the composite was; water absorption was 1.5%, void fraction was 1.02%, tensile strength was 33.15 MPa, compressive strength was 29.69 MPa and bending strength was 28.85 MPa.

Keywords

Enset fiber, Unsaturated polyester, Physical properties, Mechanical properties, False ceiling board.

The interest in natural fiber-reinforced polymer composite materials is rapidly growing both in terms of their industrial applications and fundamental research. The features of natural fibers are renewable, cheap, completely or partially recyclable, biodegradable, availability, low density, and also satisfactory mechanical properties [2]. Enset fiber, a ligno-cellulosic fiber, obtained from the pseudo-stem of Enset plant (Musa sepientum), is a bast fiber with relatively good mechanical properties [6].

Besides, based on structure adhesives classified into three groups such as thermoplastic, thermosetting and elastomeric adhesives. Thermoset adhesive molecules are cross-linked by strong covalent intermolecular bonds, forming one giant molecule. The curing results in sharp increase of strength, elasticity and stability of thermosets. Unsaturated polyester resins have been used remarkably for wide range of applications making them a thermosetting system of major importance [4]. The materials used in this work were alkali-treated Enset fiber, unsaturated polyester epoxy resin (LY556), Hardener (HY951). The Enset fiber was treated using sodium hydroxide (NaOH) before mixed together with the polymer of unsaturated polyester. The concentration of the alkali solution was used at 2.5%, 5% and 10% according to material to liquor ratio of Enset fibers soaked for 30 minutes and the fiber was washed using distilled water to remove excess NaOH and also dried at 30°C for 48 hours.

Here, characterization of the mat weave, and in this work plain mat weave was used as a reinforcement material. The number of threads in warp and weft direction of plain mat weave and the weight of mat weaves was determined.





Fig. 1. Alkaline (NaOH) treatment of Enset fiber

Fig. 2. Amount of picks and ends determination

The weight of plain mat weave was determined by mass per unit area by using GSM cutter. The average weight of the sample was around 6.50 grams per 100 cm². The average result of five different places of the developed sample was shown in Table 1. In Table 2, shown the physico-mechanical properties of the composite material in different proportional ratios of the factors such as fiber and resin.

Plain mat weave thread density

Table 1

For warp	Number of ends
Ends per ½ inch	5
Number of ends per inch (EPI)	10
For weft	Number of picks
Number of picks per ½ inch	4
Number of picks per inch (PPI)	9

Table 2

The physico-mechanical properties of composite with different proportional ratios

	F-1		Resp. 1	Resp. 2	Resp. 3	Resp. 4	Resp.5
No. of Runs	A: Fiber in %	B: Resin in %	TS in MPa	CS in MPa	BS in MPa	WA in %	VF in %
1	25	75	33.23	29.56	28.65	1.57	1.02
2	28	72	32.91	28.69	27.82	1.62	1.61
3	20	80	32.86	28.52	27.87	1.55	1.35
4	44	56	32.59	28.46	27.63	2.05	2.01
5	28	72	33.13	29.14	28.14	1.7	1.79
6	30	70	33.15	29.69	28.85	1.54	1.02
7	28	72	33.21	29.62	28.63	1.6	1.4
8	16	84	33.14	28.98	28.14	1.54	1.02
9	45	55	32.61	28.49	27.68	2.02	1.94
10	28	72	32.87	29.13	28.29	1.91	1.9
11	28	72	33.05	29.59	28.62	1.57	1.3
12	40	60	32.82	28.73	28.01	1.91	1.92
13	15	85	32.66	28.35	27.95	1.56	1.25

Hence, the better physico-mechanical properties were obtained at 30% fiber and 70% resin. The tensile strength of Enset fiber reinforced with unsaturated polyester matrix composite materials at different proportional ratio. The tensile strength (TS) of fiber reinforced composite material was 32.59 MPa and 32.66 MPa at maximum (44%) fiber loading and minimum (15%) fiber loading respectively. The tensile strength of the composite materials increases with further increase in wt. % of fiber loading and reaches a maximum of 33.15 MPa at 30% of fiber loading. The tensile strength of the model was fit based on statistical linear regression suggested value as shown in Table 3. It is important, in order to determine the correlation coefficient for the model within groups and between groups.

Table 3

Analysis variance of tensile strength

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	P-value	Remark
Model	18.22	2	18.22	7.67	0.0096	Significant
A-Fiber	6.55	1	6.55	3.40	0.0134	Significant
B-Resin	12.44	1	12.44	3.54	0.0213	Significant
Lack of fit	10.35	9	1.15	1.32	0.0662	Insignificant

The compressive strength (CS) of the model was fit based on statistical linear regression suggested value as shown in Table 4. It is important, in order to determine the correlation coefficient for the model within groups and between groups.

Table 4

Analysis variance of compressive strength

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	P-value	Remark
Model	17.12	2	8.56	6.64	0.0146	Significant
A-Fiber	6.27	1	6.27	2.45	0.0262	Significant
B-Resin	10.54	1	10.54	2.17	0.0178	Significant
Lack of fit	8.10	9	0.90	3.56	0.1331	Insignificant

The model F-value is 6.64 it suggested that the model is significant and the P-value less than 0.05 indicated model terms (fiber and resin) are significant. Hence, the factors have effect on the compressive strength of the composite. However, lack of fit F-value of 3.56 and p-value 0.1331 it implies the lack of fit is not significant; this means the material developed with in the same ratio (fiber and resin) the tested result was may be different, due to different factors such as applied load and ambient conditions. The bending strength (BS) of the composite material was tested by using three-point testing method. The bending strength of Enset fiber reinforced composite has slight increase as a result of increasing amount of fiber loading up to 30% as 27.95 MPa and further increase the fiber loading the bending strength was decreased. The maximum bending strength occurs when the fiber loading composite has 28.85 MPa at 45% fiber loading and this due to homogeneity of fibers and good bonding between fiber and matrix.

However, the bending strength does not get increase after increasing the fiber loading beyond the optimum amount, due to buckling failure [1]. The bending strength of the model was fit based on statistical linear regression suggested value as shown in Table 5. It is important, in order to determine the correlation coefficient for the model within groups and between groups.

Analysis variance of bending strength

Table 5

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	P-value	Remark
Model	20.66	2	10.33	9.35	0.0416	Significant
A-Fiber	8.42	1	8.42	3.42	0.0341	Significant
B-Resin	12.22	1	12.22	3.35	0.0318	Significant
Lack of fit	8.82	9	0.98	3.86	0.2143	Insignificant

The model F-value is 9.35 it is suggested that the model is significant and the P-value less than 0.05 indicated model terms (fiber and resin) are significant. And the factors have effect on the bending strength of the composite. However, lack of fit F-value of 3.86 and p-value 0.2143 it indicates the lack of fit is not significant; this means the material developed with in the same ratio (fiber and resin) the tested result was may be different, due to different factors such as applied load and ambient conditions. The moisture absorption of the composite materials increases linearly and rapidly, when the fiber loading increases up to the moisture uptake reaches saturation. The higher moisture uptake percentage porous effects on the composite material and it has negative effect on the mechanical properties of the composite materials [3].

The maximum water uptake was obtained when the fiber loading composite has 44% and water absorption was 2.05%. Samples of each composite type were oven dried before its weight was recorded as the initial weight of the composites. The samples were then placed in distilled water maintained at room temperature (25°C) for 24 hours. The amount of water absorbed (WA) by the composites was calculated by using the weight difference of the sample. The water absorption of the model was fit based on statistical linear regression suggested value shown in Table 6.

The model F-value is 15.99 it is suggested that the model is significant and the P-value less than 0.05 indicated model terms (fiber and resin) are significant. And the factors have effect on the bending strength of the composite. However, lack of fit F-value of 27.56 and p-value 0.9372 it indicates the lack of fit is not significant; this means the material developed with in the same ratio (fiber and resin)

the tested result was may be different, due to different factors such as applied load and ambient conditions. On the other hand, void fraction (VF) is the major defects of fiber reinforced composite and its influencing mechanical properties of the composite materials [5]. The void fraction is increase linearly when the fiber loading increase from minimum to maximum. The void fraction of the model was fit based on statistical linear regression suggested value as shown in Table 7. It is important, in order to determine the correlation coefficient for the model within groups and between groups.

Table 6

Analysis variance of water absorption

Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	P-value	Remark
Model	33.02	2	16.51	15.99	0.0080	Significant
A-Fiber	5.87	1	5.87	27.03	0.0042	Significant
B-Resin	7.96	1	7.96	29.64	0.0048	Significant
Lack of fit	2.601	9	0.289	27.56	0.9372	Insignificant

Table 7

Analysis variance of void fraction

7 man y or o ran						
Source	Sum of squares	Degree of freedom	Mean Square	F-value	P-value	Remark
Model	22.42	2	11.21	11.11	0.0029	Significant
A-Fiber	4.83	1	4.83	20.22	0.0021	Significant
B-Resin	5.74	1	5.74	22.55	0.0048	Significant
Lack of fit	5.40	9	0.60	7.06	0.8193	Insignificant

The model F-value is 7.06 it is suggested that the model is significant and the P-value less than 0.05 indicated model terms (fiber and resin) are significant. And the factors have effect on the void fraction of the composite. However, lack of fit F-value of 7.06 and p-value 0.81393 it indicates the lack of fit is not significant; this means the material developed with in the same ratio (fiber and resin) the tested result was may be different, due to different factors such as applied load and ambient conditions. Nevertheless, the developed composite material has better physico-mechanical properties with minimum thickness. In general, Enset fiber reinforced with unsaturated polyester is possible to use for the application of alternative false ceiling board material with the advantages of low cost, long service time and good aesthetic appearance.

References

- Aruchamy K. et al. Study on mechanical characteristics of woven cotton/bamboo hybrid reinforced composite laminates // Journal of Materials Research and Technology. – 2020. – Vol. 9(1). – Pp. 718–726.
- 2. Chandramohan D., Marimuthu K. A review on natural fibers // International Journal of Research and Reviews in Applied Sciences. 2011. Vol. 8(2). Pp. 194–206.
- 3. Dhakal H.N. et al. Moisture Absorption Effects on the Mechanical Properties of Sandwich Biocomposites with Cork Core and Flax/PLA Face Sheets // Molecules. 2021. Vol. 26(23). P. 7295.
- 4. Dholakiya B. Unsaturated polyester resin for specialty applications // Polyester 7. 2012. Pp. 167–202.
- 5. Mehdikhani M. et al. Voids in fiber-reinforced polymer composites: A review on their formation, characteristics, and effects on mechanical performance // Journal of Composite Materials. 2019. Vol. 53(12). Pp. 579–1669.
- 6. Temesgen A.G., Sahu O. Process ability enhancement of false banana fiber for rural development // Cellulose. 2014. Vol. 67(67). Pp. 67–89.

УДК 541.64:539.2

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ФРАГМЕНТОВ АМИЛОИДНЫХ ФИБРИЛЛ 2LMO И 6SHS

Вакулюк А.Ю.¹ (магистрант), Михтанюк С.Е.¹ (аспирант), Неелов И.М.¹ Научный руководитель – д.ф.-м.н., профессор Неелов И.М.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: vakulyuk.al@gmail.com

В статье представлено исследование стабильности фрагментов амилоидных фибрилл с применением компьютерного моделирования методом молекулярной динамики. Анализируются структуры 2LMO и 6SHS, в течение 200 пикосекунд. Моделирование показывает, что обе фибриллы остаются стабильными в течение всего времени исследования. Результаты могут быть полезны для дальнейших исследований в области влияния антиамилоидных агентов на амилоидные фибриллы.

Ключевые слова

Молекулярная динамика, амилоидные фибриллы, стабильность структур, пептиды, компьютерное моделирование.

Болезнь Альцгеймера представляет собой одну из наиболее распространенных форм деменции, на ее долю приходится от 60% до 80% случаев [1]. Подавляющее большинство людей, страдающих этим заболеванием, находятся в возрасте 65 лет и старше. А поскольку численность населения в возрасте 65 лет и старше продолжает расти, будет расти и число людей с болезнью Альцгеймера [1]. Затраты на здравоохранение и долгосрочный уход за людьми с болезнью Альцгеймера значительны, а деменция является одним из самых дорогостоящих состояний для общества [1]. Таким образом, эта патология становится все более актуальной проблемой для здравоохранения и экономики. Отличительным признаком болезни Альцгеймера является накопление белка бета-амилоида снаружи нейронов головного мозга. Бляшки и более мелкие скопления бета-амилоида могут повреждать нейроны и ткани головного мозга, нарушая межнейронные связи в синапсах [1]. Бляшки состоят из клубка олигомеров бета-амилоида и регулярно упорядоченных агрегатов, называемых амилоидными фибриллами [2]. Амилоидную фибриллу составляют U-образные пептиды, состоящие из 40-42 аминокислотных остатков, в плоскости, примерно перпендикулярной оси фибриллы. Конформационные свойства таких образований исследовались с помощью различных экспериментальных и теоретических методов. Например, методы компьютерного моделирования, в частности молекулярная динамика, в котором эволюция системы во времени взаимодействующих атомов устанавливается с помощью интегрирования их уравнений движения. Этот метод позволяет не только наблюдать структурные особенности систем, но и оценивать их стабильность в различных условиях. В данной работе проведено предварительное исследование стабильности фрагментов амилоидных фибрилл в воде с учетом контрионов Na⁺ в течение 200 пикосекунд.

Использовались структуры 2LMO [3] и 6SHS [4] из банка данных Protein Data Bank (PDB), которые показаны на рисунке 1. Первая была получена методом твердотельной спектроскопии ядерного магнитного резонанса, а вторая – криоэлектронной микроскопией. Минимизация энергии и моделирование молекулярной динамики проводили с использованием пакета GROMACS с силовым полем AMBER99SB_ILDN. Визуализация рассчитанных траекторий осуществлялась с помощью молекулярного редактора РуМОL.

На рисунке 2 представлены зависимости от времени среднеквадратичных отклонений атомов амилоидных пептидов от их начальных положений. Быстрый выход на плато и небольшие значения отклонения (0,125 нм) говорят о том, что начальная структура фибрилл почти не меняется со временем.

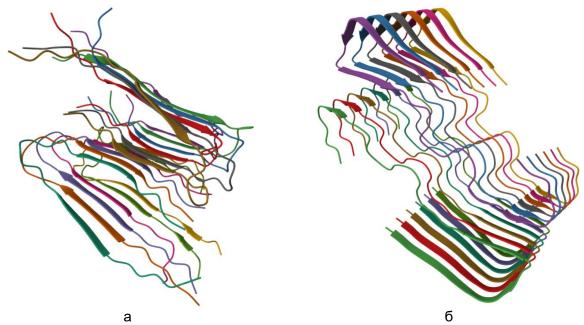


Рис. 1. Структура фрагментов амилоидных фибрилл, образованных амилоидными пептидами в конце моделирования методом молекулярной динамики: a) 2LMO; б) 6SHS

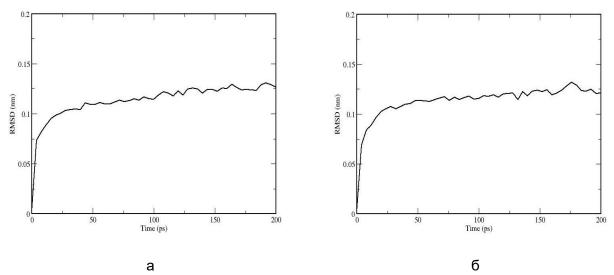


Рис. 2. График среднеквадратичного отклонения атомов пептидов от их начального положения в зависимости от времени для амилоидных структур: a) 2LMO; б) 6SHS

На рисунке 3 построены зависимости от времени радиусов инерции, которые характеризуют размеры амилоидных пептидов в исследованных структурах. Можно заметить, что размеры фибрилл не только не увеличиваются со временем (т. е. фибриллы не разваливаются), но даже немного (на 3%) уменьшаются в начале расчета (т. е. обе системы становятся более стабильными), а затем постепенно выходят на плато.

На рисунке 4 показаны карты Рамачандрана. Если строить точки, отвечающие различным парам углов Phi и Psi разным цветом, то можно определить, что они имеют различные значения для разных аминокислотных остатков (не показано). В то же время из имеющегося общего графика, достаточно хорошо видно, что две рассмотренные фибриллы имеют существенно отличающиеся распределения точек (пар углов). Также, глядя на карты Рамачандрана, можно сказать, что структура линейных пептидов в 2LMO более вытянута, чем 6SHS, так как на карте первой структуры большая доля точек сосредоточена в левом верхнем квадранте (100<Psi<180 отвечающем вытянутым бета-листовой и полипролин-II структурам пептидов), чем в нижней левой области (-100<Psi<0) отвечающей различным компактным спиральным структурам пептидов).

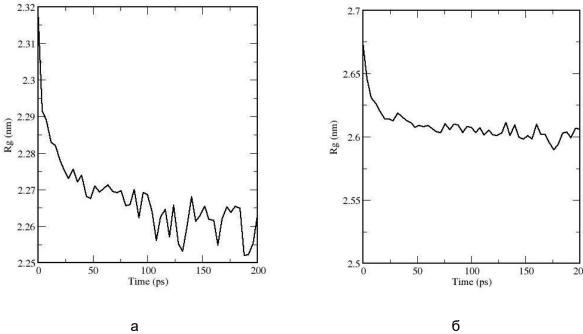
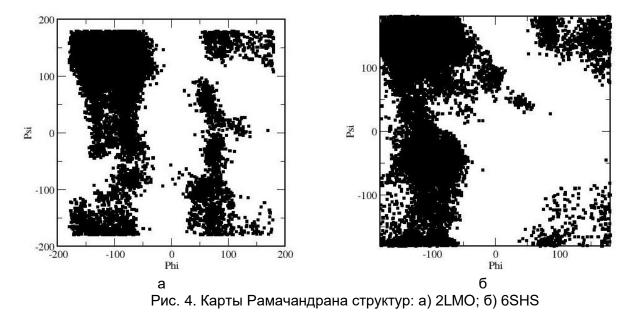


Рис. 3. График радиуса инерции в зависимости от времени для структур: a) 2LMO; б) 6SHS



Мгновенные снимки конформаций обеих рассмотренных структур в процессе всего моделирования (не показаны) близки как к начальным конформациям структур, взятым из базы данных PDB, так и к их конформациям в конце моделирования, что говорит о стабильности изучаемых фрагментов фибрилл.

Таким образом, в данной работе с помощью компьютерного моделирования, а именно метода молекулярной динамики, была исследована стабильность амилоидных фибрилл, представленных структурами 2LMO и 6SHS, в течение 200 пс. По графикам зависимости среднеквадратичного отклонения от начального положения атомов и радиуса инерции от времени, а также мгновенным снимкам моделирования можно заключить, что изучаемые структуры являются стабильными. Построенные карты Рамачандрана говорят о том, что структура 2LMO более линейна, нежели 6SHS, а также о том, что две рассмотренные фибриллы имеют разные распределения значений пар углов. Так как эти структуры демонстрируют стабильность, они могут быть использованы в дальнейшем для изучения влияния антиамилоидных агентов, например линейных и разветвленных пептидов, на устойчивость данных фрагментов амилоидные фибриллы.

Список использованных источников

- 1. 2023 Alzheimer's disease facts and figures // Alzheimer's & Dementia. -2023. -V. 19. $-N_{\odot}$. 4. -Pp. 1598–1695.
- 2. Sadigh-Eteghad S. et al. Amyloid-Beta: a crucial factor in Alzheimer's disease // Medical Principles and Practice. 2014. V. 24. №. 1. Pp. 1–10.
- 3. Paravastu A.K. et al. Molecular structural basis for polymorphism in Alzheimer's β-amyloid fibrils // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. 2008. V. 105. №. 47. Pp. 18349–18354.
- 4. Kollmer M. et al. Cryo-EM structure and polymorphism of Aβ amyloid fibrils purified from Alzheimer's brain tissue // Nature Communications. − 2019. − V. 10. − №. 1. DOI: 10.1038/s41467-019-12683-8.

УДК 54.061

ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МАСС ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МОРФОЛОГИЮ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИГИДРОКСИБУТИРАТ/ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ НАНОВОЛОКНИСТЫХ МАТОВ

*Нгуен Хоанг Тхань*¹ (аспирант), Олехнович Р.О.¹, Молчановский М.В.¹ (магистр) Научный руководитель – д.т.н., профессор Успенская М.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: hongthanhtropical@gmail.com

В работе представлены результаты влияния молекулярных масс полиэтиленгликоля на морфологию, реологические и механические свойства полигидроксибутирата /полиэтиленгликоля нановолокнистых матов. Показано, что изменение молекулярных масс ПЭГ изменяет характеристики прядильного раствора: уменьшает его электропроводность и увеличивает вязкость, что приводит к существенному изменению морфологии нановолокон и механических свойств ПГБ/ПЭГ матов.

Ключевые слова

Полигидроксибутират, полиэтиленгликоль, реологические свойства, механические свойства.

Полигидроксибутират (ПГБ) — биополимер из семейства полигидроксиалканоатов, которые обладают биосовместимостью и биоразлагаемостью. Однако, материалы на основе ПГБ имеют существенные недостатки, в частности, высокую хрупкость [1, 2]. Для улучшения свойств конечного материала на основе ПГБ часто используют полимерные композиционные системы, например, с природными полимерами (целлюлозой [3], желатином [4]) или синтетическими полимерами (ПЭ [5], ПП, ПВХ). Хорошо известно, что полиэтиленгликоль (ПЭГ) может быть использован для обеспечения большей проницаемости и улучшения механических свойств нановолокон на основе ПГБ [6–8]. Молекулярная масса является одним из решающих факторов, влияющих на свойства получаемого полимерного материала. Так, при уменьшении молекулярной массы ПЭГ с 10,000 до 2000 г.моль⁻¹ наблюдалось повышение проницаемости полимерной матрицы и снижение кристалличности материала [9]. Именно поэтому исследование влияния молекулярных масс ПЭГ на реологические свойства, морфологию волокон и механические свойства полигидроксибутират/полиэтиленгликоль нановолокнистых нетканых матов является важной задачей.

В представленной работе были получены нановолокнистые маты на основе ПГБ/ПЭГ методом электроформования. Концентрация ПГБ была постоянна и равна 8 масс. %, а концентрация ПЭГ равна 2 масс. %. Молекулярная масса ПЭГ варьировалась: 4, 6, 8 и 35 кДа. Для изготовления нановолокнистых нетканых материалов был использован барабанный коллектор со следующими технологическими параметрами: напряжение 30 кВ, скорость подачи раствора 0,5 мл/ч, расстояние между иглой и коллектором 15 см, скорость вращения барабана 500 об/мин. Морфологию нановолокнистых матов на основе ПГБ/ПЭГ изучали на микроскопе Olympus STM6. Физико-механические свойства нетканых волокнистых материалов были исследованы на растяжение согласно ГОСТ 11262-2017 на испытательной машине Instron 5943 (США) с скоростью перемещения траверсы 50 мм/мин.

На рисунке 1 представлены реологические свойства прядильных ПГБ/ПЭГ растворов. Было показано, что с увеличением молекулярной массы ПЭГ от 4 до 35 кДа происходит уменьшение электропроводности прядильного раствора с 0.146 ± 0.0042 до 0.043 ± 0.0013 µS, а вязкость увеличивается с 325 до 413 мПа*с. Факторы, такие как увеличение расстояния между цепями, снижение подвижности цепей из-за их физического переплетения и уменьшение

молекулярного порядка, все в совокупности приводит к снижению электропроводности при повышении молекулярной массы ПЭГ до 35 кДа. Уменьшение гибкости цепей, больший гидродинамический объём, более сильные межмолекулярные взаимодействия приводит к общему повышению вязкости с увеличением молекулярной массы полимера.

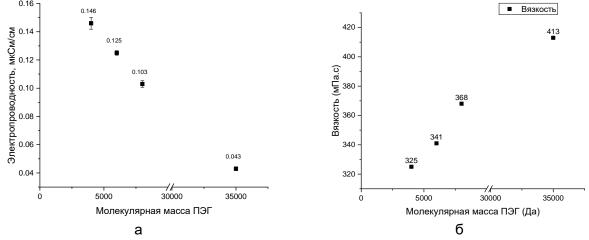


Рис. 1. Реологические свойства прядильных ПГБ/ПЭГ растворов

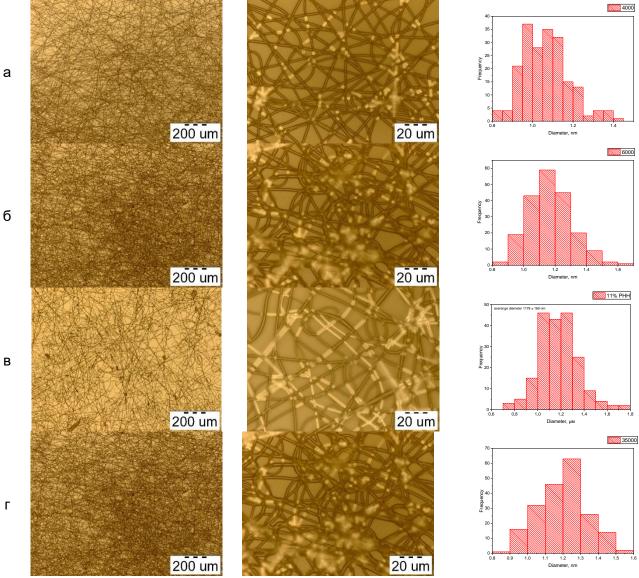


Рис. 2. Морфология и распределение диаметров ПГБ/ПЭГ нановолокон: а) 4 кДа; б) 6 кДа; в) 8 кДа; г) 35 кДа

На рисунке 2 показаны микрофотографии полученных нановолокон, а также распределение их диаметров по размерам. Стоит отметить, что при всех молекулярных массах ПЭГ практически отсутствуют дефекты, а диаметр нановолокон увеличивался с 1067 ± 114 нм до 1196 ± 137 нм при увеличении молекулярной массы ПЭГ.

Механические свойства ПГБ/ПЭГ нановолокнистых матов

Таблица

ММ ПЭГ, кДа	Предел прочности, МПа	Предел текучести, МПа	Удлинение, %	Модуль Юнга, МПа
ПГБ мат 8%	3.6 ± 0.2	3.6 ± 0.2	58 ± 21	232.3 ± 28.7
8% ПГБ + 2% ПЭГ (4 кДа)	2.7 ± 0.2	2.7 ± 0.2	66.3 ± 16.2	218.0 ± 21.9
8% ПГБ + 2% ПЭГ (6 кДа)	2.8 ± 0.1	2.8 ± 0.1	100.3 ± 5.0	212.1 ± 20.7
8% ПГБ + 2% ПЭГ (8 кДа)	2.5 ± 0.1	2.5 ± 0.1	87.7 ± 10.3	162.6 ± 7.8
8% ПГБ + 2% ПЭГ (35 кДа)	2.4 ± 0.1	2.5 ± 0.1	56.3 ± 22.3	188.8 ± 23.0

В таблице представлены механические свойства ПГБ/ПЭГ нановолокнистых матов. Видно, что предел прочности увеличился с 2.7 ± 0.2 МПа до максимального значения 2.8 ± 0.1 МПа, соответствующего 6 кДа ПЭГ, а затем снижался до 2.4 ± 0.1 МПа при увеличении Мw ПЭГ до 35 кДа. Удлинение при разрыве увеличилось с 66.3 ± 16.2 % до 100.3 ± 5.0 (для ПЭГ с Мw 6 кДа), затем уменьшалось до 56.3 ± 22.3 % (для ПЭГ с Мw 35 кДа). Известно, что при увеличении количества введённой в полимер добавки ограничивается подвижность макромолекулярных цепей полимера. Однако при увеличении молекулярной массы добавки длина её цепи также увеличивается, что в определённой степени может привести к смещению структуры исходных цепей полимера и, как следствие, к снижению его механических свойств.

Таким образом, изменение молекулярных масс ПЭГ изменяет характеристики прядильного раствора: уменьшает его электропроводность и увеличивает вязкость, что приводит к существенному изменению морфологии нановолокон и механически свойств ПГБ/ПЭГ матов.

Список использованных источников

- 1. McAdam B. et al. Production of polyhydroxybutyrate (PHB) and factors impacting its chemical and mechanical characteristics // Polymers (Basel). MDPI AG. 2020. Vol. 12. №. 12. Pp. 1–20.
- 2. Rajan K.P. et al. Polyhydroxybutyrate (PHB): A Standout Biopolymer for Environmental Sustainability // Handb. Ecomater. Springer, Cham. 2019. Pp. 1–23.
- 3. Tănase E.E. et al. PHB/Cellulose Fibers Based Materials: Physical, Mechanical and Barrier Properties // Agric. Agric. Sci. Procedia. Elsevier. 2015. Vol. 6. Pp. 608–615.
- 4. Wang Y.W., Wu Q., Chen G.Q. Gelatin Blending Improves the Performance of Poly(3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyhexanoate) Films for Biomedical Application† // Biomacromolecules. American Chemical Society. −2004. −Vol. 6. −№ 2. −Pp. 566–571.
- 5. Babaniyi R.B., Afolabi F.J., Obagunwa M.P. Recycling of used polyethylene through solvent blending of plasticized polyhydroxybutyrate and its degradation potential // Compos. Part C Open Access. Elsevier B.V. 2020. Vol. 2. DOI: 10.1016/j.jcomc.2020.100021.
- 6. Parra D.F. et al. Influence of poly (ethylene glycol) on the thermal, mechanical, morphological, physical-chemical and biodegradation properties of poly (3-hydroxybutyrate) // Polym. Degrad. Stab. − 2006. − Vol. 91. −№ 9. − Pp. 1954–1959.
- 7. Tomietto P. et al. Biobased polyhydroxyalkanoate (PHA) membranes: Structure/performances relationship // Sep. Purif. Technol. Elsevier. 2020. Vol. 252. P. 117419.
- 8. Chan R.T.H. et al. Application of polyethylene glycol to promote cellular biocompatibility of polyhydroxybutyrate films // Int. J. Polym. Sci. Hindawi Limited. 2011. Vol. 2011. DOI: 10.1155/2011/473045.
- 9. Sing Liow K. et al. Effect of PEG Molecular Weight on the Polyurethane-Based Quasi-Solid-State Electrolyte for Dye-Sensitized Solar Cells // Multidisciplinary Digital Publishing Institute. − 2022. − Vol. 14. − №. 17. − P. 3603.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Инфохимия

Инфохимия

УДК 579.678

ГИДРОКСИАПАТИТНЫЕ ПАТТЕРНЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ПОДХОДОВ ДИФФЕРЕНЦИРОВКИ БАКТЕРИЙ

Осьмак $O.O.^1$ (студент), Ашихмина $M.C.^1$ (аспирант), Володарский $M.O.^1$ (студент), Филозоп $B.C.^1$ (студент) Научный руководитель — к.х.н. Уласевич $C.A.^1$

1 – Университет ИТМО

email: Osmak@itmo.ru

В работе рассмотрена разработка нового метода дифференцировки бактерий *in situ* на основе гидроксиапатитных паттернов с рН-чувствительным индикатором, что обосновано необходимостью создания новых методов обнаружения бактерий. Несмотря на то, что существующие методы чувствительны и селективны, их недостатками являются стоимость и сложность исполнения. Рассматриваемые в данной статье градиентные системы могут использоваться для миниатюризации тестовых систем, что может существенно сократить время эксперимента.

Ключевые слова

Паттерны гидроксиапатита, кольца Лизеганга, бактерии, *in situ*, индикатор, культивирование, молочная кислота.

В современной пищевой микробиологии особое внимание уделяется быстрым и автоматическим методам определения количества микроорганизмов [1–3]. В последнее время особенно привлекательными стали супрамолекулярные структуры для разработки динамичных и отзывчивых архитектур для работы с живыми системами на микро- и наноуровне [2, 3]. Такие структуры могут быть спроектированы так, чтобы реагировать на внешние стимулы, и высвобождать активные вещества для управления поведением роста бактерий. Быстрая идентификация бактерий очень важна во многих областях здравоохранения и безопасности, включая медицину, пищевую промышленность, окружающую среду и др. В связи с этим важно разработать доступные и надежные инструменты, позволяющие проводить быстрый, выборочный и высокочувствительный анализ.

На данный момент для оценки количества микроорганизмов в зависимости от их метаболизма, в пищевой промышленности широко используются различные методы, такие как иммунологические методы (подсчет колоний), иммуноферментный анализ (ELISA) и методы на основе нуклеиновых кислот, такие как полимеразная цепная реакция (ПЦР) [1]. Несмотря на чувствительность к определению метаболитов данных методов, они требуют достаточно много времени и использования дорогостоящего оборудования, что в свою очередь сказывается на стоимости эксперимента [2]. В настоящее время разрабатываются различные биосенсоры на основе рН-чувствительных индикаторов для быстрой идентификации бактерий [2, 3]. Однако особенный интерес представляют собой системы детекции и визуализации бактерий *in situ*.

Разрабатываемая нами система сфокусирована на изучении метаболитов бактерий *in situ* во время культивирования с целенаправленным высвобождением ростовых веществ из структур гидроксиапатита (ГА), позволяющих регулировать скорость высвобождения веществ, и биополимерных молекул, создающих определенную структуру и заряд поверхности для адсорбции и роста бактерий.

На основе данной системы могут быть созданы различные биосенсоры или проведена оптимизация процесса культивации бактерий. Кроме того, такие градиентные системы могут использоваться для миниатюризации тестовых систем, где вместо десяти исследуемых образцов с различной концентрацией вещества, можно использовать одну градиентную

систему, где в кольцах будет загружено разное количество вещества. В результате каждый паттерн ГА высвобождает требуемое количество вещества, которое оказывает воздействие на бактерии, при этом сохраняются одинаковые условия эксперимента. В зависимости от загружаемого вещества можно также визуализировать процесс роста бактерий и их жизненный цикл *in situ*.

Изучение метаболитов бактерий *in situ* во время их культивирования с целенаправленным высвобождением питательных веществ из ГА структур предлагает мощный инструмент для понимания метаболизма бактерий и разработки стратегий манипулирования поведением микроорганизмов в практических целях. Это позволит в свою очередь разработать различные сенсоры для детекции роста бактерий.

Основой для детектирования бактерий являются кальций-фосфатные структуры, так называемые кольца Лизеганга. Кольца Лизеганга образуются в результате совместной диффузии хлорида кальция в гидрогелевую матрицу агара. Механизм образования периодической структуры был предложен исследователем В.Ф. Оствальдом [4]. Диффузия ионов Ca^{2+} приводит к увеличению их концентрации до концентрации насыщения, рассчитанной из константы растворимости гидроксиапатита. Затем происходит осаждение первого кольца ГА и концентрация ионов Ca^{2+} снижается ниже значения насыщения. При увеличении концентрации ионов Ca^{2+} кольца ГА образуются снова.

Для образования таких периодичных структур были смешаны агар (производитель: Becton Dickinson), натрия гидрогенфосфат додекагидрат (Na₂HPO₄·12H₂O; \geq 99,99%; производитель: ЛенРеактив), кальция хлорид дигидрат (CaCl₂·2H₂O; \geq 99,99%; производитель: formula) и рН-чувствительный индикатор (бромтимоловый синий (производитель: ЛенРеактив) / феноловый красный (производитель: BEKTOH)). Агар, Na₂HPO₄ и индикатор растворяли в дистиллированной воде до полного растворения и автоклавировали при 121°C 1,1 а.т.м. В стерильных условиях среду переносили в чашку Петри (Ø 90 мм) до полного застывания, после чего в центр чашки Петри добавляли 1M раствор CaCl₂ с целью получения колец Лизеганга. После образования колец Лизеганга были высеяны бактерии *Streptococcus thermophilus* поверхностным посевом и помещены в термостат при 37°C. Схема эксперимента представлена на рисунке 1.

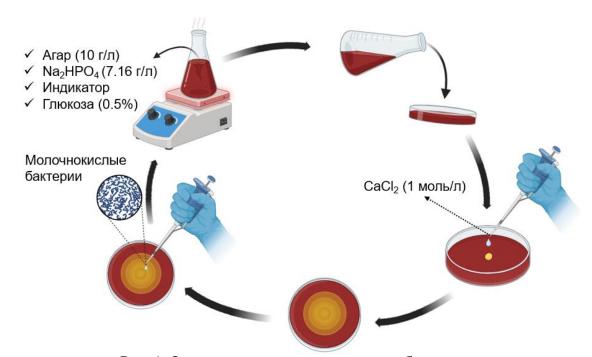


Рис. 1. Схема синтеза гидроксиапатита с бактериями

С целью формирования системы, на которой будут расти и кольца Лизеганга, и бактерии, необходимо было провести оптимизацию питательной среды. В ходе эксперимента с

бромтимоловым синим было выявлено, что при наличии глюкозы происходит кристаллизация бромтимолового синего при концентрации выше 10^{-3} моль/л (рис. 2). С целью устранения данного дефекта были проведены серии экспериментов с различной концентрацией индикатора. Однако было выяснено, что при концентрации $5\cdot10^{-4}$ моль/л бромтимоловый синий все еще кристаллизуется (рис. 4), но при концентрации 10^{-4} моль/л и $5\cdot10^{-5}$ моль/л кристаллизации индикатора не было обнаружено. Таким образом, для дальнейшей работы был выбран бромтимоловый синий в концентрации 10^{-4} моль/л и $5\cdot10^{-5}$ моль/л (рис. 2).

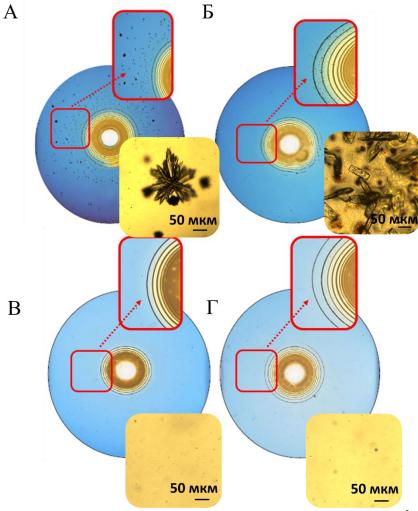


Рис. 2. Образец с бромтимоловым синим с концентрацией: А −10⁻³ моль/л; Б − 5·10⁻⁴ моль/л; В − 10⁻⁴ моль/л; Г − 5·10⁻⁵ моль/л. На врезке внизу оптические микроскопические изображения кристаллов с чашки Петри со сформированными кольцами Лизеганга в матрице агара с использованием 0,02 M Na₂HPO₄ и 1 M CaCl₂. Масштабная линейка составляет 1 см

Кроме того, была проведена серия экспериментов с различными концентрациями фенолового красного. Стоит отметить, что при работе с раствором фенолового красного, концентрацией 10^{-3} моль/л, кристаллизации не происходило. Для удостоверения в данном результате была проведена серия экспериментов с феноловым красным при различных концентрациях (рис. 3).

Для исследования культивирования молочнокислых бактерий на выбранных средах первоначально была сделана ночная культура, затем засеивали бактерии, концентрацией 10^2 клеток/мл на среды, после чего образцы помещали в термостат при 37° С. Каждые сутки рост бактерий оценивали визуально, снимая образцы на сканере для наблюдения за ростом бактерий и изменением цвета индикатора (рис. 4).

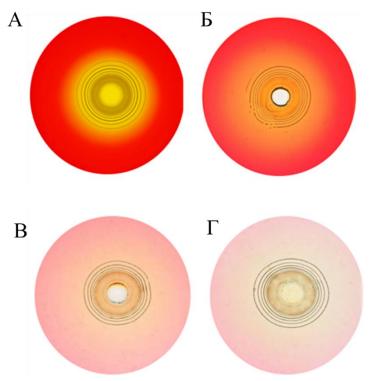


Рис. 3. Образцы с феноловым красным при различной концентрации: $A-10^{-3}$ моль/л, $B-5\cdot10^{-4}$ моль/л, $B-10^{-4}$ моль/л, $C-5\cdot10^{-5}$ моль/л

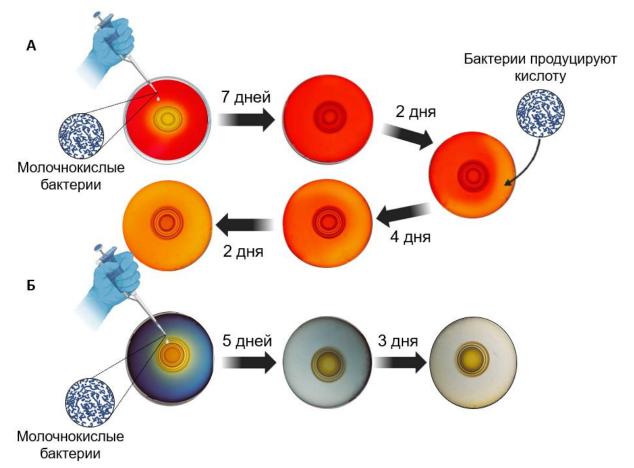


Рис. 4. Изменение цвета индикаторов в течение времени после добавления молочнокислых бактерий: A – феноловый красный, Б – бромтимоловый синий

Оценку эффективности работы разработанной системы оценивали по изменению цвета индикатора. Изменение рН среды обусловлено ростом бактерий и выработку ими молочной кислоты. Стоит отметить, что с бромтимоловым синим наблюдается максимально быстрый анализ *in situ*, что может быть обусловлено лучшим ростом бактерий и продуцированием ими молочной кислоты.

При использовании фенолового красного в качестве индикатора цвет образцов изменялся более плавно, что может быть обусловлено более медленным ростом бактерий (рис. 4).

В настоящий момент система активно дорабатывается, поскольку ограничивающими факторами данной системы являются недостаточное количество питательных веществ для быстрого роста бактерий (например, как азот) и длительность процесса, который достигает до 20 суток с учетом формирования колец Лизеганга. Проводится также оптимизация среды.

Таким образом, была разработана методика создания тест-системы определения молочной кислоты *in situ*. Показано, что полученная система позволяет определять наличие бактерий *in situ*, а также, в перспективе, позволят автоматически определять количество молочной кислоты. Дальнейшие исследования будут направлены на совершенствование системы и нахождения оптимальных компонентов, которые будут комфортны для роста ГА структур и бактерий, что позволит сократить время эксперимента.

Список использованных источников

- Hameed S., Xie L., Ying Y. Conventional and emerging detection techniques for pathogenic bacteria in food science: A review // Trends in Food Science & Technology. – 2018. – V. 81. – Pp. 61–73.
- 2. Ranjbar S., Farahmand Nejad M.A., Parolo C., Shahrokhian S., Merkoci A. Smart Chip for Visual Detection of Bacteria Using the Electrochromic Properties of Polyaniline // Analytical Chemistry. − 2019. − №. 91(23). − Pp. 14960–14966.
- 3. Prosser J.I., Killham K., Glover L.A., Rattray E.A.S. Luminescence-based systems for detection of bacteria in the environment // Critical Reviews in Biotechnology. 1996. V. 16. N. 2. Pp. 157–183.
- 4. Duley J.M., Fowler A.C., Moyles I.R., O'Brien S.B.G. On the Keller-Rubinow model for Liesegang ring formation // Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 2017. V. 473. P. 20170128.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Безопасность информационных технологи
Безопасность информационных технологий

УДК 629.735.3

СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ ПО РАДИОКАНАЛАМ В БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ

Здорников $E.O.^1$ Научный руководитель — к.т.н., ассистент Попов $И.Ю.^1$ 1- Университет ИТМО

e-mail: e.zdornickow2012@yandex.ru

Статья об информационной безопасности в беспилотных транспортных средствах (БТС) подчеркивает актуальность проблемы в контексте быстрого развития технологий. Рассматривается роль радиоканалов в обмене данными между БТС и внешними системами, а также возникающие угрозы, такие как перехват данных и спуфинг сигналов. Обсуждаются основные принципы обеспечения информационной безопасности, включая шифрование, аутентификацию и обнаружение вторжений. Также освещаются законодательные и нормативные аспекты в этой области. Аннотация позволяет понять важность обеспечения безопасности данных в радиоканалах для эффективной и безопасной работы беспилотных транспортных средств.

Ключевые слова

Беспилотные транспортные средства, информационная безопасность, перехват данных, спуфинг, меры безопасности.

С развитием технологий беспилотных транспортных средств (БТС), вопросы информационной безопасности приобретают всё большую актуальность. БТС, включающие в себя автономные автомобили, дроны, и другие транспортные средства без водителя, становятся неотъемлемой частью современной инфраструктуры. Они обещают повышение эффективности и безопасности передвижения, однако в то же время представляют новые вызовы в области защиты данных и информационной безопасности.

БТС постоянно обмениваются данными с внешними источниками, такими как спутниковые системы, базовые станции и другие транспортные средства. Эта передача данных осуществляется по радиоканалам, что делает её потенциально уязвимой для различных видов атак, включая перехват данных, несанкционированный доступ и спуфинг сигналов. Кроме того, специфика работы БТС требует высокой скорости передачи данных и минимальной задержки, что создает дополнительные трудности в обеспечении безопасности.

Особую сложность представляет обеспечение безопасности в условиях динамически меняющейся среды, где БТС должны адаптироваться к изменениям в окружающем пространстве и принимать решения в реальном времени. Всё это выдвигает на первый план вопросы разработки и внедрения надежных методов защиты информации, которые способны обеспечить конфиденциальность, целостность и доступность данных.

Таким образом, в контексте БТС информационная безопасность становится не только важным аспектом технологического прогресса, но и ключевым элементом обеспечения безопасности и надежности всей транспортной системы. Исследования в этой области направлены на создание комплексных решений, которые смогут противостоять современным и будущим угрозам в мире постоянно развивающихся технологий.

Рассматривая беспилотные транспортные средства прежде всего нужно обратить внимание на его основные компоненты:

1. **Сенсоры и датчики**: Основой функционирования БТС являются сенсоры и датчики, которые собирают данные об окружающей среде. Это включает в себя камеры, лидары (лазерные радары), радары, ультразвуковые датчики и GPS-приемники. Сенсоры

- обеспечивают БТС информацией о дорожных условиях, препятствиях, дорожной разметке, сигналах светофоров и других транспортных средствах.
- 2. Компьютерное зрение и обработка данных: Алгоритмы компьютерного зрения анализируют данные, поступающие от сенсоров, для интерпретации сцен на дорогах и обнаружения объектов. Обработка данных включает в себя анализ больших объемов информации в реальном времени для принятия решений.
- Системы управления и навигации: Автономные системы управления обрабатывают полученные данные и принимают решения о маневрировании, ускорении, замедлении и остановке. Навигационные системы используют GPS и другие технологии для определения маршрута и позиционирования БТС на дороге.
- 4. Беспроводная коммуникация: БТС часто оснащены технологиями беспроводной связи, такими как Wi-Fi, Bluetooth, 5G, и V2X (vehicle-to-everything) для обмена данными с другими транспортными средствами и инфраструктурой. Принцип работы БТС строится на трех базовых пунктах:
- 1. Восприятие окружающего мира: БТС постоянно сканируют окружающую среду, собирая данные с множества сенсоров для создания динамической карты местности.
- Принятие решений: Искусственный интеллект и машинное обучение позволяют БТС анализировать собранные данные и принимать решения, имитируя водительское поведение. Это включает выбор маршрута, реагирование на изменения в дорожных условиях и взаимодействие с другими участниками движения.
- 3. Исполнительные механизмы: После принятия решения системы управления активируют исполнительные механизмы, такие как рулевое управление, тормоза и акселератор, для выполнения необходимых маневров.

Радиоканалы в беспилотных транспортных средствах (БТС) представляют собой средства беспроводной связи, используемые для передачи данных между БТС и различными внешними системами. Это включает в себя связь с контрольными центрами, другими транспортными средствами, инфраструктурными элементами (например, дорожными знаками и светофорами), а также сетями для обмена трафиком и метеорологической информацией.

Радиоканалы в БТС часто используют различные технологии, такие как Wi-Fi, Bluetooth, 5G, а также специализированные протоколы, например, Dedicated Short-Range Communications (DSRC) и Cellular Vehicle-to-Everything (C-V2X). Эти технологии обеспечивают высокоскоростную передачу данных и могут поддерживать мобильную связь на больших расстояниях. Радиоканалы используются для множества функций в БТС, включая, но не ограничиваясь, обновлениями программного обеспечения, передачей телеметрических данных, получением карт и обновлений дорожных условий, а также для V2V (vehicle-tovehicle) и V2I (vehicle-to-infrastructure) коммуникаций.

Для обеспечения функциональной безопасности беспилотного транспорта необходимо обеспечить информационную безопасность в радиоканалах [1]. Информационная безопасность в радиоканалах включает в себя защиту конфиденциальности, целостности и доступности передаваемых данных. Это важно для предотвращения несанкционированного доступа, перехвата, изменения или блокирования данных, которые могут быть критически важны для безопасной и эффективной работы БТС. Основными угрозами для радиоканалов в БТС являются [2]:

- 1. Перехват данных (Eavesdropping): Несанкционированный доступ к передаваемой информации.
- Спуфинг и фальсификация сигналов: Создание ложных сигналов или данных для введения в заблуждение систем управления БТС.
- Jamming и Denial-of-Service (DoS) атаки: Намеренные попытки блокировать или нарушить радиокоммуникации.
- Уязвимости протоколов: Слабые места в протоколах беспроводной связи, которые могут быть эксплуатированы злоумышленниками.

Для обеспечения безопасности данных в радиоканалах применяются различные техники и методы:

- 1. Шифрование: Использование сильных алгоритмов шифрования для защиты данных во время передачи [3].
- 2. **Аутентификация и проверка подлинности:** Удостоверение в подлинности участников радиосвязи, чтобы гарантировать, что данные передаются и получаются доверенными сторонами. Это может включать в себя использование цифровых сертификатов, сложных паролей и многофакторной аутентификации.
- 3. **Обнаружение и предотвращение вторжений:** Системы обнаружения и предотвращения вторжений (IDS/IPS) могут использоваться для мониторинга сетевого трафика на наличие подозрительных активностей или известных угроз [4].
- 4. **Регулярные обновления и патчи:** Поддержание актуальности программного обеспечения и протоколов, включая регулярное применение патчей безопасности, для защиты от известных уязвимостей.
- 5. **Сегментация сети:** Разделение сетевых ресурсов БТС на различные сегменты для минимизации рисков в случае компрометации одного из них.
- 6. Законодательные и нормативные аспекты: С учетом важности безопасности радиоканалов в БТС, законодательство и нормативные стандарты играют важную роль. Они определяют требования к безопасности и конфиденциальности, обязательные для всех участников индустрии БТС. Это включает в себя как национальные, так и международные стандарты и регуляции.

При рассмотрении возможных векторов атаки на беспилотное транспортное средство стоит рассмотреть угрозы безопасности данных в радиоканалах:

Перехват данных

Описание: Перехват данных (Eavesdropping) в радиоканалах происходит, когда несанкционированные стороны перехватывают передаваемую информацию. В контексте БТС это может включать перехват телеметрических данных, маршрутов, команд управления и другой конфиденциальной информации.

Риски: Нарушение конфиденциальности, возможность отслеживания или вмешательства в работу БТС [5].

Внедрение вредоносного ПО

Описание: Вредоносное ПО может быть внедрено в системы БТС через радиоканалы, особенно если существуют уязвимости в программном обеспечении или протоколах связи.

Риски: Позволяет злоумышленникам управлять функциями БТС, собирать данные или даже приводить к авариям.

Спуфинг

Описание: Спуфинг в контексте радиоканалов БТС включает подделку сигналов или данных (например, GPS-спуфинг), в результате чего БТС могут получать ложную информацию о своем положении или окружающей среде.

Риски: Дезориентация БТС, неверное принятие решений, потенциально опасные ситуации на дороге.

Джамминг (Помехи)

Описание: Джамминг или создание помех в радиоканалах - это намеренное вмешательство в радиосигналы, чтобы нарушить или полностью блокировать их передачу. Риски: Потеря связи с БТС, нарушение их функциональности, создание потенциально опасных ситуаций.

При разработке и конструировании беспилотных средств необходимо учитывать их особенности:

Мобильность:

а) Проблематика: Мобильность БТС означает, что они постоянно переходят из одной сети в другую, что повышает риски безопасности при переключении между различными точками доступа или сетями;

b) Вызовы: Обеспечение непрерывной и безопасной связи в динамически меняющихся условиях.

Ограниченные вычислительные ресурсы:

- а) Проблематика: БТС часто имеют ограниченные вычислительные ресурсы, что затрудняет реализацию сложных алгоритмов шифрования и обработку больших объемов данных;
- b) Вызовы: Необходимость баланса между эффективностью защиты и ограниченными вычислительными мощностями.

Потребности в реальном времени:

- а) Проблематика: БТС требуют обработки и передачи данных в реальном времени для немедленного реагирования на дорожные условия и управление транспортным средством;
- b) Вызовы: Обеспечение быстрой и безопасной обработки и передачи данных, минимизация задержек при сохранении высокого уровня безопасности.
 - В заключение хотелось отметить следующие моменты:

Ключевые угрозы: Основные угрозы безопасности данных в радиоканалах БТС включают перехват данных, внедрение вредоносного ПО, спуфинг и джамминг. Эти угрозы требуют комплексного подхода в области безопасности.

Современные решения: Применение современных методов шифрования данных, специализированных протоколов безопасности, усиленных мер физической безопасности и управления доступом, а также развитие систем обнаружения и реагирования на инциденты является ключевым для защиты БТС.

Рекомендации: Для эффективной защиты БТС необходимо постоянное обновление и адаптация безопасностных мер к новым угрозам, а также интеграция между физической безопасностью, программным обеспечением и сетевыми протоколами.

В качестве перспектив будущих исследований:

- 1. Развитие Искусственного Интеллекта: Изучение потенциала искусственного интеллекта в области предсказания и предотвращения кибератак, особенно в динамичных условиях, характерных для БТС.
- 2. **Квантовая Криптография:** Исследование возможностей квантовой криптографии для повышения безопасности передачи данных в условиях растущих киберугроз.
- 3. **Безопасность 5G и Следующих Поколений Сетей:** Анализ угроз и разработка защитных мер, связанных с использованием технологий 5G и последующих поколений в БТС.
- 4. **Интеграция Стандартов Безопасности:** Разработка и стандартизация комплексных международных норм и стандартов в области информационной безопасности для БТС.
- 5. **Адаптивные Системы Безопасности:** Создание адаптивных систем безопасности, способных динамически настраиваться в ответ на меняющиеся условия и новые виды угроз.

Эффективная защита БТС от киберугроз требует не только применения современных технологических решений, но и постоянного развития и адаптации этих мер в ответ на постоянно меняющийся ландшафт угроз. Мультидисциплинарный подход, объединяющий знания и навыки в области информационных технологий, кибербезопасности, инженерии и права, является ключевым для гарантии безопасности и надежности будущих беспилотных транспортных систем.

Список используемых источников:

- 1. Jalil Hadi, Yue Cao "Cyber Attacks and Vulnerabilities Assessment for Unmanned Aerial Vehicles Communication Systems". [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://ieeexplore.ieee.org/document/10043088 (дата обращения: 01.02.2024).
- 2. Kyusuk Han "Employing automotive security to improve the security of unmanned aerial vehicles". [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/frcmn.2023.1122231/full (дата обращения: 29.01.2024).

- 3. Vishakha K Ralegankar, Jagruti Bagul, Bhaumikkumar Thakkar, Rajesh Gupta, S. Tanwar, Gulshan Sharma, I. Davidson "Quantum Cryptography-as-a-Service for Secure UAV Communication: Applications, Challenges, and Case Study". [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://consensus.app/papers/quantum-cryptographyasaservice-secure-communication-ralegankar/f02fd667df905756853e125486bade80 (дата обращения: 27.01.2024).
- 4. Mahmod Al-Bkree "Managing the cyber-physical security for unmanned aerial vehicles used in perimeter surveillance". [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://consensus.app/papers/managing-security-vehicles-used-perimeter-surveillance-albkree/57eeaff0a0595bbba6a03e25b6420705 (дата обращения: 28.01.2024).
- 5. Yohan Park, Daeun Ryu, D. Kwon, Youngho Park "Provably Secure Mutual Authentication and Key Agreement Scheme Using PUF in Internet of Drones Deployments". [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://consensus.app/papers/managing-security-vehicles-used-perimeter-surveillance-albkree/57eeaff0a0595bbba6a03e25b6420705 (дата обращения: 28.01.2024).

УДК 004.75

ПРИМЕНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ КОНСЕНСУСА В БЛОКЧЕЙНЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ

Кича И.В. 1 (студент) Научный руководитель— к.т.н., доцент Таранов С.В. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: kicha@niuitmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В работе рассмотрены возможности применения алгоритмов консенсуса Proof-of-Previous-Transactions, Proof-of-Space, Proof-of-Spacetime и Proof-of-History в системах распределенного хранения данных, применимость чего обосновывается необходимостью снижения затрат ресурсов, увеличения производительности систем при соблюдении высокого уровня защищенности и отказоустойчивости.

Ключевые слова

Блокчейн, распределенные системы хранения данных, вычислительные сети, алгоритмы консенсуса, смарт-контракты.

В ходе решения задачи обеспечения доступности информации в системах распределенного хранения данных возникают следующие проблемы:

- высокие ресурсные и энергетические затраты на операции в блокчейне (так, например, для добычи одного блока Bitcoin требуется в среднем 1449 киловатт-часов, что сопоставимо с потреблением среднего американского домохозяйства за 13 лет);
- низкая скорость работы блокчейн-сетей (так Bitcoin обрабатывает 5–7 транзакций в секунду, Ethereum до 20-ти, в то время как Visa способная обрабатывать до 24 000 транзакций в секунду, а MasterCard в среднем обслуживает около 5000);
- отсутствие доверия между участниками сети (любой участник сети может стать обработчиком транзакций, имея достаточно ресурсов, в связи с чем сохраняется возможность получения управления последовательностью злоумышленником).

Таким образом, становится необходимым провести оптимизацию процессов обработки и хранения данных в блокчейне за счет применения неклассических алгоритмов консенсуса, лишенных этих недостатков.

Для постановки задачи поиска альтернативных алгоритмов консенсуса, следует рассмотреть основные аспекты наиболее известных и изученных подходов: Proof-of-Work (PoW) и Proof-of-Stake (PoS).

Для Proof-of-Work характерно следующее:

- новый блок образуют участники сети путем решения определенных вычислительных задач, за что получают награду, как правило фиксированное количество криптовалюты;
- решение необходимых задач является сложным процессов, который расходует большое количество электроэнергии и нуждается в использовании огромных вычислительных мощностей;
- стоит отметить маленькую скорость обработки транзакций сетью (на данный момент время подтверждения транзакции может достигать 10 минут) и склонность к централизации крупными майнинговыми фермами [1].

Примером реализации алгоритма консенсуса Proof-of-Work является криптовалютный проект Bitcoin.

Proof-of-Stake появился в противовес предыдущему алгоритму и имеет уже следующие особенности:

- валидаторы транзакции в сети выбираются по принципу количества криптовалюты, которой они владеют в рамках сети;
- владельцы валюты могут заморозить свои монеты, чтобы гарантировать создание нового блока и завершение транзакции, в случае успеха чего получают награду;
- потребляет значительно меньше энергии, чем PoW;
- сеть может столкнуться с централизацией системы крупными стейк-холдерами и таким образом стать уязвимой к стейк-атакам [1].

Известным проектом с использованием этого алгоритма является Ethereum.

В качестве альтернативы предлагается рассмотреть алгоритм консенсуса Proof-of-Previous-Transactions (PoPT), который был предложен в качестве согласованного механизма для параллельного учета. Он включает PBFT (Practical Byzantine Fault Tolerance) для процедуры отбора кандидатов. Параллельные вычисления позволяют нескольким вычислителям управлять транзакциями, что приводит к возможности одновременного добавления нескольких блоков в блокчейн (рис. 1 [2]). Так, повышается скорость работы сети за счет использования параллельных вычислителей, которые более эффективно обрабатывают крупные транзакции [2]. На фоне PoW данный механизм работает быстрее, при этом считается достаточно надежным. Тем не менее алгоритм не лишен недостатков: за счет того, что он базируется на Византийской отказоустойчивости, имеет плохую масштабируемость, поэтому остается решением преимущественно для частных сетей.

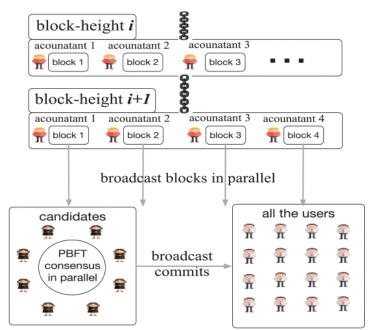


Рис. 1. Схема работы алгоритма PoPT в связке с PBFT

Есть необходимость рассмотреть следующий механизм консенсуса, а именно Proof-of-Capacity (PoC), иногда называемый Proof-of-Space и Proof-of-Storage. Принцип его работы заключается в том, что основным используемым ресурсом участников является память устройства, зачастую жесткого диска (рис. 2 [3]). В конечном итоге доказательство наличия определенных данных у пользователя и является способом достижения консенсуса в распределенных системах: пользователи могут сверять хранимые данные и между собой и большинством верифицировать транзакцию. Proof-of-Capacity сильно схож с PoW, но если во втором алгоритме пользователи используют вычислительные мощности, то в первом – носители информации, что приводит к существенному уменьшению потребления электроэнергии [3]. В ходе работы пользователи заполняют доступное им пространство на жёстких дисках списками одноразовых номеров (nonce), в каждый из которых включает в себя 8192 заранее просчитанных

случайных хэша. Чем больше места майнер предоставляет системе, тем выше вероятность, что среди расположенных данных обнаружится необходимая последовательность хэшей и, как результат, пользователь получит вознаграждение. Таким образом, PoC становится очень экономичным вариантом на фоне PoW и PoS, но при этом имеет низкий уровень надежности и высокую уязвимость к различного рода атакам [1].

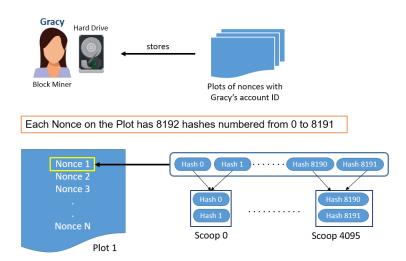


Рис. 2. Хранимые данные в Proof-of-Capacity

Также существует ответвление данного алгоритма под названием Proof-of-Spacetime. Механизм Proof-of-Capacity очень уязвим к атаке с двойным использованием места, в результате чего один и тот же объем памяти используется несколько раз и может привести к различного рода махинациям. Proof-of-Spacetime же нацелен на то, чтобы сеть оперировала структурой «пространства-времени», что позволяет определять, какое место и какой период времени было использовано [4]. Такая система усложняет работу сети и делает ее более надежной, но в конечном счете алгоритм может стать сопоставим с Proof-of-Work в количестве требуемых вычислений. Это приводит к снижению ее производительности, при этом будет требоваться использовать хранилища данных, помимо вычислительных мощностей, что становится экономически нецелесообразно.

В связи с этим следует также рассмотреть механизм консенсуса Proof-of-History (PoH). Построение блокчейна происходит последовательно, с использованием функции хэширования SHA-256. Система принимает на вход хэш предыдущей транзакции и генерирует для новой, в результате чего становится возможным установить последовательность операци. Алгоритм имеет детерминированную финальность. В результате чего исключается появление «форков» и соответственно отмененных блоков [5]. Так, РоН имеет низкие требования к хранилищам данных, так как содержит лишь хэши с временными метками и при этом не запрашивает большие вычислительные мощности, в связи с отсутствием сложных вычислительных задач (рис. 3 [5]).

Таким образом, механизм является очень быстрым и способен обрабатывать до 1000 транзакций в секунду в базовой своей реализации [1]. Тем не менее, безопасность сети может быть подорвана, если будет производится атака на источник времени или он будет иметь неточности. В перспективе алгоритм может быть незначительно усложнен для устранения описанной уязвимости, а также его вычисления могут быть ускорены за счет масштабирования сети, что может сделать скорость обработки транзакций еще более высокой. В таблице представлен результат сравнения рассмотренных в данной статье алгоритмов консенсуса.

В качестве вывода стоит сказать следующее, для небольших сетей наиболее простой и понятной будет реализация PoPT, которая значительно быстрее PoW, при этом с сохранением высокой надежности. Тем не менее, наилучшим решением с точки зрения скорости обработки, доступности и целостности, что как раз и важно в системах хранения данных, является Proof-of-History, хотя в дальнейшем есть необходимость исследования этого алгоритма с целью повышения защищенности.

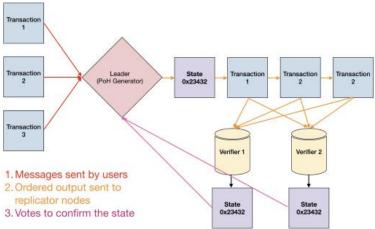


Рис. 3. Процесс генерации блока в Proof-of-History [5]

Таблица

Сравнение рассмотренных алгоритмов консенсуса

Алгоритм консенсуса	Необходимый ресурс	Максимальное количество обрабатываемых транзакций в секунду	Использование вычислительных мощностей	Устойчивость к атакам
PoPT	Вычислительные мощности	1200	Низкое	Уязвим, если больше 1/3 узлов злоумышленники
PoC	Жесткий диск	12	Минимальное	Уязвим к двойным тратам и многократному подтверждению транзакций с помощью одинаковых хранимых данных
PoST	Жесткий диск и вычислительные мощности			Склонен к централизации
РоН	Вычислительные мощности	1000	Низкое	Склонен к атакам на источник времени

Список использованных источников:

- 1. Lashkari B., Musilek P. A comprehensive review of blockchain consensus mechanisms // IEEE Access. 2021. T. 9. Pp. 43620–43652.
- 2. Xiang F., Huaimin W., Peichang S. Proof of previous transactions (PoPT): An efficient approach to consensus for JCLedger // IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems. − 2019. − T. 51. − №. 4. − Pp. 2415–2424.
- 3. Dziembowski S. et al. Proofs of space // Annual Cryptology Conference. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg. 2015. Pp. 585–605.
- 4. Moran T., Orlov I. Simple proofs of space-time and rational proofs of storage // Advances in Cryptology—CRYPTO 2019: 39th Annual International Cryptology Conference, Santa Barbara, CA, USA, August 18–22, 2019, Proceedings, Part I 39. Springer International Publishing,. 2019. Pp. 381–409.
- 5. Yakovenko A. Solana: A new architecture for a high performance blockchain v0. 8.13 // Whitepaper. 2018.

УДК 51-74

ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ С НУЛЕВЫМ РАЗГЛАШЕНИЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ЗАДАЧАХ ПОИСКА ИЗОГЕНИЙ

Максимова А.Ю.¹ (студент) **Научный руководитель** – к.т.н. Давыдов В.В.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: anna.j.maksimova@mail.ru

В работе рассмотрен математический аппарат эллиптических кривых и изогений, а также математический аппарат доказательств с нулевым разглашением и сигма-протоколов. Рассмотрены протоколы CSI-FiSh, SeaSign и SQISign, которые являются протоколами с нулевым разглашением, основанными на задаче поиска изогений. Произведен анализ протоколов по эффективности выполнения и используемой памяти.

Ключевые слова

Эллиптические кривые, изогении, нулевое разглашение, CSI-FiSh, SeaSign, SQISign.

Криптография на эллиптических кривых является одной из актуальных областей постквантовой криптографии. Проблема поиска изогений находит применение в протоколах с нулевым разглашением, которые могут быть использованы для обеспечения безопасности. Важно понимать, как устроены такие протоколы, проанализировать их достоинства и недостатки.

Эллиптическая кривая E – это график уравнения вида

$$y^2 = x^3 + Ax + B, \tag{1}$$

где A и B — это константы с предположением, что $4A^3 + 27B^2 \neq 0$. Уравнение (1) называется уравнением Вейерштрасса для эллиптической кривой [1].

A, B, x и y обычно считаются элементами поля, например, одного из конечных полей F_p для простого числа p или одного из конечных полей F_q , где $q=p^k$ с $k\geq 1$.

На множестве точек на эллиптической кривой E задана операция сложения. С заданной операцией сложения точки на E образуют аддитивную абелеву группу с элементом ∞ в качестве нейтрального.

Изогения – сюръективное групповое отображение между двумя эллиптическими кривыми, не обязательно обратимое. Эквивалентно можно утверждать, что изогения — групповое отображение с конечным ядром [2].

Две кривые называются изогенными, если между ними существует изогения.

Для вычисления изогенных эллиптических кривых и изогений по заданной эллиптической кривой используются формулы Велу.

Изогении из кривой в себя называются эндоморфизмами. Если добавить операцию умножения на 0, то множество всех эндоморфизмов эллиптической кривой E образует кольцо относительно операций сложения и композиции, обозначаемое End(E).

Для построения безопасного протокола необходимо использовать вычислительно сложные задачи. Одной из таковых может служить проблема обратимости действия группы. Она формулируется следующим образом: дана эллиптическая кривая E с кольцом эндоморфизмов О, необходимо найти идеал $a \subset O$, т. ч. $E = aeE_0$.

Также существует и проблема многоцелевой обратимости действия группы [3].

Доказательство с нулевым разглашением — протокол, позволяющий одной стороне доказать достоверность утверждения, не разглашая никакой другой информации второй стороне.

Данный протокол обладает следующими свойствами:

- полнота;
- корректность;
- нулевое разглашение.

Доказательства с нулевым разглашением могут быть как интерактивными, так и неинтерактивными.

Одним из типов доказательств с нулевым разглашением являются сигма-протоколы. В данном протоколе происходит общение между доказывающим Р и проверяющим V. Доказывающий хочет убедить проверяющего в том, что для некоторого утверждения x, известного Р и V, он знает свидетеля w, т.ч. $(x,w) \in R$ для некоторого отношения R. Доказывающий Р начинает протокол, генерируя первое сообщение $com \leftarrow P_1(x,w)$ (часто называемое обязательством) и отправляя его проверяющему V. Затем проверяющий выбирает вызов $chall \leftarrow C$ случайным образом из пространства вызовов C и отправляет его Р. Наконец, Р вычисляет ответ $resp \leftarrow P_2(chall)$ и отправляет его V, который запускает алгоритм верификации $V_2(x,com,chall,resp)$, который выводит 1 или 0, сигнализируя о том, что V принимает или отклоняет доказательство соответственно [4].

Классическим примером протокола с нулевым разглашением является протокол идентификации Фиата-Шамира. Взяв за основу данный протокол, переложив его на математический аппарат изогений и преобразовав в неинтерактивную версию, можно получить эвристику Фиата-Шамира на изогениях. Она активно применяется для преобразования сигмапротоколов для сложных отношений цифровых подписей в неинтерактивные доказательства с нулевым разглашением.

Составляющие неинтерактивного протокола в контексте цифровых подписей выглядят следующим образом:

- публичный ключ объект для сложного отношения x;
- секретный ключ свидетель w для этого отношения;
- вызов *chall* = H(m, x, com), где m сообщение для подписи;

Сама же подпись состоит из сообщений обязательства и ответа. Для её проверки нужно пересчитать значение хеш-функции и запустить алгоритм проверки сигма-протокола.

Сигма-протокол CSI-FiSh (как и сигма-протокол SeaSign) основывается на отношении CSIDH, которое определяется как

$$R_{CSIDH} = \{(E, x) \in Ell \times \mathbf{Z}^r \mid [x]E_0 = E\},\$$

где [x]E — это действие вектора $x \in \mathbf{Z}^r$ на эллиптическую кривую $E \in Ell$. Протокол предполагает знание структуры циклической группы $cl(\mathbf{Z}[\sqrt{-p}])$. В [4] приводится переход к действию группы с $\mathbf{Z}/N\mathbf{Z}$ на Ell вместо \mathbf{Z}^r . Сигма-протокол работает следующим образом:

- 1. Доказывающий Р выбирает значение $b \in \mathbf{Z}/\mathbf{NZ}$, вычисляет $E' = [b]E_0$ и отправляет E' проверяющему.
- 2. Проверяющий выбирает и отправляет значение $c \in \{-1,0,1\}$.
- 3. Доказывающий вычисляет значение $r = b cx \mod N$ и отправляет его проверяющему.
- 4. Проверяющий вычисляет E'. Если c=-1, то E'=[r]E', если c=0, то $E'=[r]E_0$, а если c=1, то E'=[r]E.

С помощью эвристики Фиата-Шамира сигма-протокол преобразуется в неинтерактивное доказательство, называемое CSI-FiSh (Commutative Supersingular Isogeny Fiat—Shamir). Протокол может быть использован лишь для небольших параметров, т. к. вычисление структуры циклической группы для больших параметров неэффективно.

Второй протокол основан на том же отношении, но теперь у нас нет знания структуры группы $cl(\mathbf{Z}[\sqrt{-p}])$. Сигма-протокол SeaSign устроен следующим образом:

- 1. Доказывающий Р выбирает значение $b \in [-\delta B, \delta B]^r$, вычисляет $E' = [b]E_0$ и отправляет E' проверяющему.
- 2. Проверяющий выбирает и отправляет значение $c \in \{-1,0,1\}$.
- 3. Доказывающий вычисляет значение $r = b cx \mod N$ и если $r \notin [-(\delta 1)B, (\delta 1)B]^r$, то отправляет его проверяющему, иначе обрывает выполнение сигма-протокола.
- 4. Проверяющий вычисляет E'. Если c=-1, то E'=[r]E', если c=0, то $E'=[r]E_0$, а если c=1, то E'=[r]E.

Аналогично предыдущему случаю сигма-протокол можно преобразовать в неинтерактивное доказательство с помощью эвристики Фиата-Шамира. Данный протокол менее эффективен по сравнению с предыдущим, но может быть использован для больших параметров.

Протокол SQISign работает с полными графами суперсингулярных изогений и использует кватернионные алгоритмы. Имеется секретная изогения $\phi:E_0\to E_1$. Доказывающий сначала вычисляет случайную изогению $\psi:E_0\to E_2$ и отправляет E_2 . Проверяющий вычисляет и отправляет еще одну случайную изогению $\phi:E_2\to E_3$, а доказывающий в ответ должен вычислить $\sigma:E_1\to E_3$. Протокол SQISign работает с малым размером параметров, подпись, основанная на этом протоколе, является одной из наименьших постквантовых подписей, основанных на изогениях. По времени работы протокол в целом эффективен, но еще требует доработки.

Таким образом, выбор протокола для использования зависит от поставленной задачи и имеющихся данных. При знании информации о циклической группе $\mathbf{Z}[\sqrt{-p}]$ может быть использован протокол CSI-FiSh, но лишь для малых параметров. При необходимости использования больших параметров может быть использован протокол SeaSign. Протокол SQISign быстр и работает с небольшими параметрами, но если использовать подпись на этом протоколе, то подписание неэффективно и требует оптимизации.

Список использованных источников

- 1. Washington L. Elliptic Curves: Number Theory and Cryptography, Second Edition. 2-е изд. Chapman & Hall/CRC, 2008. 536 с.
- 2. De Feo L. Mathematics of Isogeny Based Cryptography // CoRR. 2017. №abs/1711.04062.
- 3. Beullens W., Kleinjung T., Vercauteren F. CSI-FiSh: Efficient Isogeny based Signatures through Class Group Computations // Cryptology ePrint Archive, Paper 2019/498. 2019. DOI: 10.1007/978-3-030-34578-5_9.
- 4. Bullen's W., De Feo L., Galbraith S.D. Proving knowledge of isogenies: a survey. // Designs, Codes and Cryptography. 2023. № 91. C. 3425–3456.

УДК 004.932.2

МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК ПРЕЗЕНТАЦИИ НА БИОМЕТРИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНОЙ СЕТИ С МЕХАНИЗМОМ ВНИМАНИЯ

Пикуль A.C.¹ (студент)

1 – Университет ИТМО

e-mail: aleksandrpikul134@gmail.com

Предложен новый подход для улучшения распознавания атак презентации на биометрическую систему распознавания лиц с помощью сверточной сети с механизмом внимания. Проверена центральная гипотеза, которая заключалась в том, что с помощью механизма внимания возможно улучшить результаты работы исходной сверточной нейронной сети. В ходе экспериментов гипотеза была подтверждена. Наибольший прирост по качеству был достигнут на наборе данных NUAA-до внедрения механизма внимания в сверточную сеть ACER=10,858%, после внедрения механизма внимания ACER=7,028%.

Ключевые слова

Сверточные нейронные сети, механизм внимания, биометрия, презентационная атака, обнаружение атак презентации.

Глубокие нейронные сети можно разделить на три основные концепции: сверточные нейронные сети; рекуррентные нейронные сети; механизмы внимания.

Наиболее применимым подходом в обработке изображений на данный момент являются сверточные нейронные сети. Тем не менее данный подход уже не является наиболее развивающимся.

На сегодняшний день механизмы внимания становятся наиболее перспективным методом из-за значительных достижений сначала в области машинного перевода, а затем в обработки изображений. При работе с изображениями такая архитектура позволяет сети выделять наиболее важные для принятия решения области. Пример карты внимания на рисунке 1 [1].



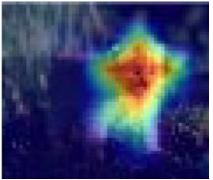


Рис. 1. Пример карты внимания

Концепции глубоких нейронных сетей можно комбинировать между собой.

Рассмотрим сверточную нейронную сеть ResNet-18 (рис. 2 [2]). Ее архитектуру можно условно разделить на 4 блока — это блоки conv_layers1, conv_layers2, conv_layers3 и conv_layers4. На выходе каждого из блоков можно извлечь карты характеристик. При этом от блока к блоку карты характеристик передаются в необработанном виде.

Идея состоит в том, чтобы, получая карты характеристик, дополнительно обрабатывать их механизмом внимания, а выход передавать на вход очередного сверточного слоя.

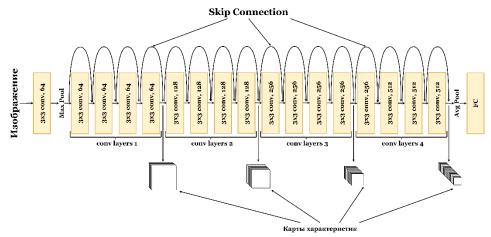


Рис. 2. Сверточная нейронная сеть ResNet-18

Существуют разные способы реализации механизма внимания. Наиболее простой вариант – однослойная нейронная сеть (рис. 3). На вход механизма внимания подается тензор, который извлекается после сверточного слоя. Извлеченный тензор проходит через блок внимания и передается на очередной блок свертки.

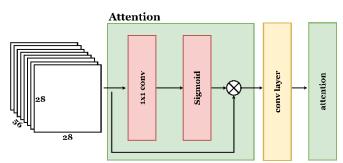


Рис. 3. Простейший механизм внимания

В результате получается следующая архитектура (рис. 4): на вход подается изображение лица. Полученное изображение обрабатывается сначала слоем свертки, затем слоем внимания. Для ResNet-18 эти шаги повторяются еще три раза для трех оставшихся карт характеристик, полученных после слоев свертки. Для принятия решения функция активации сигмоида выдает вероятность. Полученная вероятность сравнивается с заранее заданным порогом. Если полученная вероятность больше заданного порога, то считаем, что на входе был живой человек, если меньше, то на входе была атака презентации.

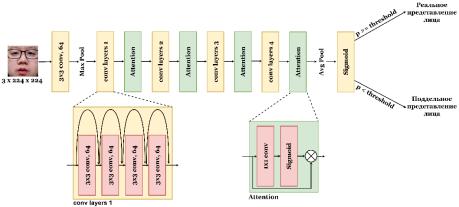


Рис. 4. Предложенная архитектура

Для обучения предложенной архитектуры применялись две базы данных: LCC-FASD (табл. 1 [3]) и NUAA (табл. 2 [4]).

Количество образцов в наборе данных LCC-FASD

Таблица 1

KOM 1001BO COPACEOB B HACOPO MAINIBIX 200 17 10B								
	Оригинал	Подделка						
Обучение	1553	13508						
Тестирование	389	3377						

Количество образцов в наборе данных NUAA

Таблица 2

	Опиринал	Поддолио
	Оригинал	Подделка
Обучение	1743	1748
Тестирование	3362	5761

Оценка качества производилась по трем метрикам: матрица рассеяния, ROC-кривая и ACER. Чем больше значение ROC-кривой и меньше значение ACER, тем лучше происходит распознавание атаки.

Гипотезу можно сформулировать следующим образом — действительно ли механизм внимания позволит улучшить результат распознавания для исходной сверточной нейронной сети. Тестирование проводилось в два этапа: тестирование ResNet-18 без механизма внимания и тестирование ResNet-18 с механизмом внимания.

В ходе проведения экспериментов были получены следующие результаты.

1) На наборе данных LCC-FASD:

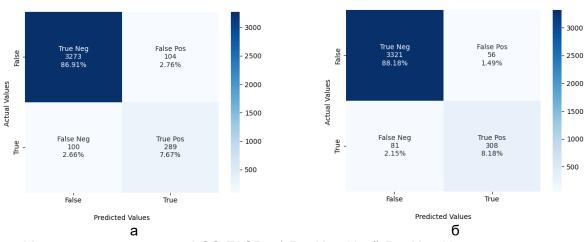


Рис. 5. Матрица рассеяния для LCC-FASD: a) ResNet-18, б) ResNet-18 + механизм внимания

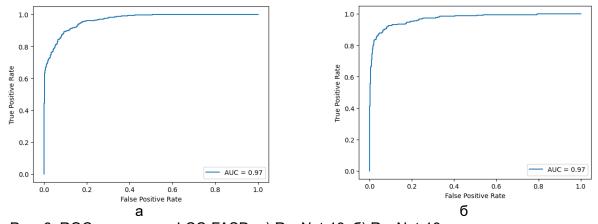


Рис. 6. ROC-кривая для LCC-FASD: a) ResNet-18, б) ResNet-18 + механизм внимания

Таблица 3

ACER на наборе данных LCC-FASD

	ResNet-18	ResNet-18 + механизм внимания
ACER, %	14,393	11,240

2) На наборе данных NUAA:

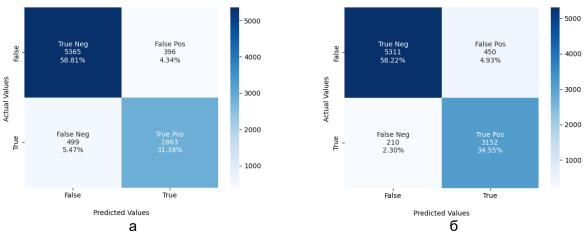


Рис. 7. Матрица рассеяния для NUAA: a) ResNet-18, б) ResNet-18 + механизм внимания

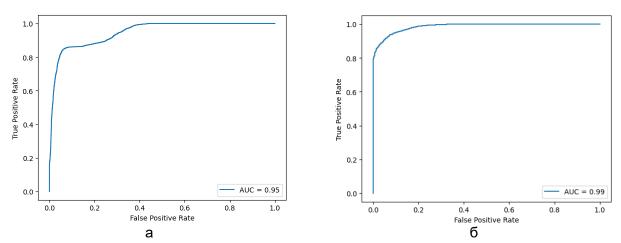


Рис. 8. ROC-кривая для NUAA: a) ResNet-18, б) ResNet-18 + механизм внимания

ACER на наборе данных NUAA

Таблица 4

	ResNet-18	ResNet-18 + механизм внимания
ACER, %	10,858	7,028

При тестировании на наборе данных LCC-FASD было достигнуто уменьшение ошибки распознавания по метрике ACER на 3,153%. На NUAA – на 3,83%. Это означает, что результаты относительно обычного ResNet-18 были улучшены, следовательно, исходная гипотеза подтвердилась — с помощью механизма внимания возможно улучить работу исходной сверточной нейронной сети.

Список использованных источников

- 1. Visual Attention Network. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://arxiv.org/abs/2202.09741 (дата обращения 13.02.2024).
- 2. Kaiming He, Xiangyu Zhang, Shaoqing Ren, Jian Sun. Deep Residual Learning for Image Recognition // 2016 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). CVPR, 2016.

- 3. Large Crowdcollected Face Anti-Spoofing Dataset. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://csit.am/2019/proceedings/PRIP/PRIP3.pdf (дата обращения 13.02.2024).
- 4. Xiaoyang Tan, Yi Li, Jun Liu, Lin Jiang. Face Liveness Detection from A Single Image with Sparse Low Rank Bilinear Discriminative Model // Computer Vision–ECCV, 2010.

УДК 004.056.53

РАЗРАБОТКА СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРЕ СКАНЕРА УЯЗВИМОСТЕЙ WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ

Пимашин Е.Н.¹ (студент) Научный руководитель – к.т.н., доцент Канжелев Ю.А.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: zizzs3228@gmail.com

Статья представляет описание процесса разработки средства мониторинга, способного автоматически обнаруживать уязвимости в web-приложениях. Используя мягкий и деликатный подход к эксплуатации каждой уязвимости, предложенное средство обеспечивает высокую эффективность без риска повреждения целевой системы. Работа предлагает перспективное решение для повышения безопасности веб-приложений в реальном времени.

Ключевые слова

Мониторинг, уязвимость, web-приложение, сканер, эксплуатация, безопасность.

В современном цифровом мире обеспечение безопасности информации важно, как никогда ранее, особенно в контексте развития веб-технологий и расширения интернета. Вебприложения становятся неотъемлемой частью повседневной жизни, они используются для обработки и хранения чувствительных данных, таких как финансовая информация, персональные данные пользователей и многое другое. Однако, с ростом функциональности и сложности веб-приложений, увеличивается их уязвимость перед атаками злоумышленников. Для обеспечения безопасности таких приложений требуется эффективное средство мониторинга, способное автоматически выявлять потенциальные уязвимости и предотвращать возможные атаки.

На сегодняшний день существует множество инструментов и методов для обнаружения уязвимостей в веб-приложениях, однако многие из них имеют свои ограничения и недостатки. Некоторые инструменты слишком агрессивны и могут вызывать непредвиденные последствия, такие как отказ в обслуживании (DoS) или повреждение данных. Другие же могут пропускать определенные типы уязвимостей из-за ограничений своих алгоритмов.

В качестве сравнительных аналогов я выбрал Owasp Zap и Burp Suite Professional, это два мощных инструмента, которые, однако, находятся в разных ценовых категориях. OWASP Zap бесплатный, как и разрабатываемый мною инструмент, а Burp Suite стоит 449\$ в год на момент написания этой статьи. Встроенный в Burp Suite сканер не справляется со своими задачами, а OWASP Zap не эксплуатирует, а лишь сигнализирует об отсутствии защиты от определённых уязвимостей, которые находятся на пользовательском уровне, игнорируя серверный.

В разработке любого программного продукта ключевым аспектом является соблюдение жизненного цикла программного обеспечения (ПО), который включает в себя ряд этапов, начиная от идеи и заканчивая тестированием и внедрением. Жизненный цикл, которому я следовал, представлен на рисунке 1 [1]. Мой сканер уязвимостей для веб-приложений не является исключением, и в данном разделе мы рассмотрим каждый этап жизненного цикла ПО в контексте его разработки.

При выборе языка программирования и библиотек я провел тщательный анализ, а также изучил доступные варианты. Учитывая необходимость в гибкости, простоте в использовании и обширном функциональном наборе, мой выбор остановился на Python. Этот язык программирования обладает обширной экосистемой библиотек и фреймворков, и я решил

использовать библиотеку requests для облегчения работы с HTTP-запросами. Кроме того, для обеспечения эффективной обработки больших объемов данных и повышения производительности, я выбрал многопоточность и воспользовался стандартной библиотекой threading. Таким образом, Python в сочетании с библиотекой requests и модулем threading обеспечивает надежное и эффективное решение для реализации поставленной задачи.

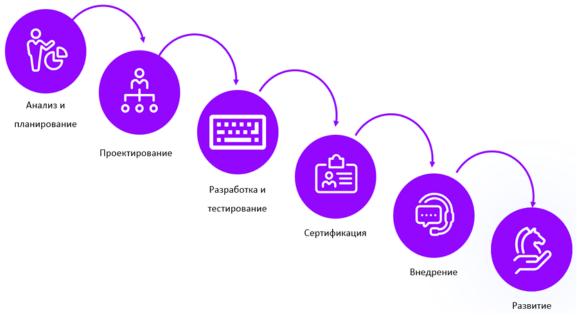


Рис. 1. Жизненный цикл разработки ПО

На этапе проектирования было принято решение о реализации модульной архитектуры, в которой каждый модуль будет отвечать за тестирование конкретной уязвимости. Такой подход позволяет более эффективно управлять кодом, облегчает его поддержку и расширение. Кроме того, в сочетании с выбранной многопоточной моделью, эта архитектура позволит запускать модули одновременно, что значительно ускорит процесс сканирования и обнаружения уязвимостей. Такое разделение ответственности между модулями и параллельное выполнение задач способствуют повышению производительности и эффективности разработанного сканера. Межмодульное взаимодействие реализовано через глобальные переменные Python.

Основным модулем всего сканера является модуль "crawler", который является ключевым для автоматизации сканирования. Без него было бы невозможно эффективно найти все доступные для тестирования веб-страницы внутри доменного имени и всех его поддоменов. Модуль "crawler" позволяет сканировать веб-приложение и автоматически обнаруживать новые страницы для последующего тестирования на наличие уязвимостей. "Crawler" работает в трёх режимах:

- 1. Перебор по словарю.
- 2. Парсер URL-адресов.
- 3. Смешанный.

Первый режим подходит для маленьких web-сервисов и ctf-соревнований, он проводит одну итерацию перебора по словарю самых популярных URL web-страниц. Второй режим подходит для средних и крупных сервисов, которые имеют прописанные "robots.txt" и "sitemap.xml". При втором режиме модуль "crawler" ищет на странице ссылки на другие URL внутри этого домена и рекурсивно продолжает поиск по найденным ссылкам, анализируя страницы и файлы с расширениями ".php", ".html", ".js" и ".css", что позволяет собирать информацию даже с динамических web-страниц. На рисунке 2 [2] представлен гипотетический пример того, как этот модуль находит неизвестные до этого web-страницы, имея на вход только 1 URL. Соответственно, третий режим представляет собой смешанный режим, где сначала проходит одна итерация перебора, а затем найденные страницы передаются в парсер, что увеличивает площадь покрытия.

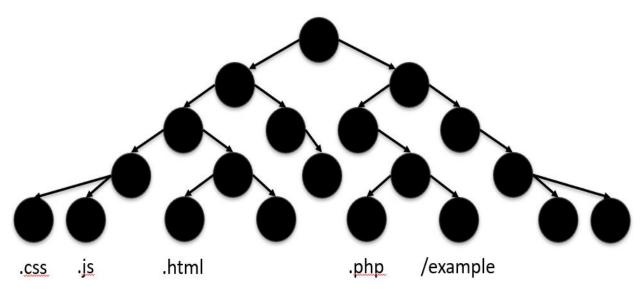


Рис. 2. Пример работы модуля "crawler"

Модуль "payload generator" играет важную роль в создании разнообразных тестовых данных для обхода первичной защиты от некоторых уязвимостей. Он принимает на вход словарь, содержащий различные варианты потенциально опасных данных, и на основе этого словаря генерирует различные виды полезной нагрузки. В частности, данный модуль создает 6 различных вариантов полезной нагрузки, включая один в исходной форме, а также 1, 2 и 3 варианта, подвергнутых URL-кодированию. Кроме того, модуль генерирует один словарь полезных нагрузок, закодированный в формате base64, а также один словарь, который сначала подвергается URL-кодированию, а затем кодируется в base64. Такой подход к генерации полезной нагрузки обеспечивает обход первичных методов защиты от потенциальных уязвимостей, что повышает эффективность тестирования и обнаружения уязвимостей веб-приложений.

Модули тестирования уязвимостей веб-приложений имеют схожую структуру и методологию, поскольку большая часть веб-уязвимостей можно отнести к инъекциям [1]. Инъекции — это один из наиболее распространенных классов уязвимостей, которые возникают изза недостаточной обработки ввода пользователей. При тестировании инъекций используются аналогичные подходы и техники, которые направлены на выявление уязвимых точек в приложении. Однако, различия могут возникнуть в ожидаемой реакции серверной или клиентской части приложения на внедренные инъекции. Например, при тестировании SQL-инъекций ожидается задержка ответа от сервера, в то время как при тестировании XSS-инъекций ожидается, что появится уведомление с текстом, как в полезной нагрузке. Тем не менее, в общем плане, модули тестирования уязвимостей веб-приложений используют подобные методы, такие как ввод специальных символов и строк в поля форм, манипуляции с URL-адресами и заголовками запросов и анализ ответов сервера. Этот подход обеспечивает комплексное тестирование на уязвимости, что важно для обеспечения безопасности веб-приложений.

Таким образом, в текущей версии сканера реализованы следующие модули:

- Crawler;
- Payload Generator;
- SQL;
- XSS;
- XXE;
- 403-Bypass.

Тестирование проводилось на комплексе виртуальных машин VPLE, восьми уязвимых web-приложениях и подготовленных стендах с нескольких СТF-соревнований. Этот подход позволил создать реалистичное окружение для тестирования разрабатываемого сканера. Реализованные модули тестирования уязвимостей в сочетании с модулем "payload generator" проявили свою эффективность даже при максимальном уровне защиты веб-приложений.

Результаты тестирования на восьми виртуальных машинах, а также на подготовленных стендах с нескольких СТF-соревнований, выявили преимущества разработанного сканера перед конкурирующими решениями. В частности, Вигр Suite демонстрировал способность обнаруживать уязвимости только в рамках XSS и проблем с шифрованием [2], в то время как OWASP Zap обнаруживал недостаточную защиту от таких атак, как CSRF и ClickJacking на стороне клиента [3]. Что абсолютно неприемлемо в контексте безопасности web-приложений, потому что критических уязвимостей, через которые можно нарушить конфиденциальность, целостность и доступность, было намного больше, чем нашли эти перечисленные сканеры. В то время, как разработанный сканер успешно выявил и серверные уязвимости, такие как SQL и XXE. Это указывает на его эффективность в обнаружении различных видов угроз, не ограничиваясь лишь клиентской стороной веб-приложений. Таким образом, предложенное средство мониторинга информационной безопасности представляет собой ценный инструмент для обнаружения уязвимостей веб-приложений, обладающий преимуществами по сравнению с существующими аналогами. Его использование может значительно повысить уровень безопасности веб-приложений и снизить риск возможных атак.

С развитием технологий угрозы в web-приложениях сдвигаются в сторону логических уязвимостей, где контекст общего проектирования сервиса важнее для эксплуатации уязвимости, чем сама особенность системы. Поэтому я считаю, что для ускорения проведения работ по тестированию на проникновение, необходимо развивать автоматизированные сканеры, которые будут высвобождать экспертное время тестировщиков на проникновение, которое они могут отдать на поиск логических уязвимостей.

Список использованных источников

- 1. Леонькова И.П. Анализ методов обеспечения безопасности веб-приложений // Молодой ученый. 2019. №. 12 (250). С. 25–28. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://moluch.ru/archive/250/57416/ (дата обращения: 21.02.2024).
- 2. Нгуен Ной Хыу. Создание программы для сканирования уязвимостей веб-приложений // Молодой ученый. 2018. №. 21 (207). С. 139–145. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://moluch.ru/archive/207/50847/ (дата обращения: 21.02.2024).
- 3. Прачёв И.С. Методы защиты веб-приложений от CSRF-атак // Молодой ученый. 2022. — № 8 (403). — С. 4—7. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: https://moluch.ru/archive/403/89068/ (дата обращения: 21.02.2024).

УДК 004.056

МОДЕЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ

Тимкин А.К. 1 (студент) Научный руководитель — к.ф.-м.н., доцент Комаров И.И. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: timkinalex@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

В данной работе рассматривается модель оценки достоверности информации получаемой мультиагентной группой автономных необитаемых подводных аппаратов (АНПА) для мониторинга морских акваторий, оцениваются различные ограничения и особенности реализации модели.

Ключевые слова

Мультиагентная система, автономный необитаемый подводный аппарат, достоверность информации, морская безопасность, модель оценки.

Одной из актуальных задач в области проектирования информационных гидроакустических систем, является получение достоверной информации об объектах, расположенных в прибрежных акваториях. Современные системы мониторинга в основном являются стационарными или используют единичные мобильные решения, которые не позволяют получить достоверную информацию об обстановке в акватории.

Использование новых методов мониторинга акваторий, таких как мультагентные группы АНПА, позволят быстро реагировать на нарушение охраняемых территорий и получать достоверную информацию об объектах.



Рис. 1. Беспилотный катер, возможный нарушитель безопасности акватории

Для оценки достоверности получаемой информации мультиагентной системой (MAC) АНПА опишем основные компоненты системы: аппаратные характеристики, алгоритмы взаимодействия, внешние факторы [1].

При разработке модели достоверности информации используем некоторые ограничения и допущения. Разделим работу системы на внешнее воздействие и внутреннее взаимодействие. Примем несколько обязательных условий для реализации модели:

1. Модель ограничена временем t.

- 2. Энергетический запас аккумуляторных батарей является конечным и зависит от режима работы АНПА.
- 3. Модель рассматривается в двумерном пространстве, так как в качестве акваторий используется прибрежная зона, в которой можно пренебречь глубиной без большой потери точности.
- 4. Характеристики гидроакустических антенн малых и средних размеров позволяют не учитывать гидроакустические аномалии.
- 5. Группировка АНПА контролируется удаленным оператором через центр коммуникации.
- 6. Пространственное расположение агентов и центра коммуникации в начале моделирования считается достоверными.
- 7. С точки зрения информационного взаимодействия АНПА гомогенные.

Нужно отметить, что при масштабировании модели на более крупные системы нельзя использовать допущения и ограничения, используемые в данной работе.

Рассмотрим внутреннее взаимодействие МАС АНПА, а именно характеристики сетей связи и метод взаимодействия между агентами. Система состоит из гомогенных агентов, с равными правами. В группе присутствует центр коммуникации, который передает информацию между активной группой агентов и удаленным оператором. В качестве центра коммуникации могут выступать различные устройства:

- 1. Стационарная антенна, которая устанавливается на дне акватории и взаимодействует с оператором по посредством кабеля, проложенного по дну.
- 2. Гидроакустический модем, закрепленный на буй, который переводит гидроакустический канал связи в радиоканал и передает информацию оператору.
- 3. Надводное судно, выступающее центром коммуникации.

Рядовые агенты могут выступать в роли ретрансляторов и передавать через соседних агентов информацию в центр коммуникации. Ограничением расположения агентов в пространстве выступает либо необходимость иметь прямую связь агента с центром коммуникации, либо иметь возможность передавать информацию в центр коммуникации опосредованно через соседнего агента. Сам центр коммуникации выступает только в роли ретранслятора и не обладает возможностью гидролокационного сканирования окружающей обстановки. Как и любая централизованная система, данная система подвержена риску, связанному с преднамеренной или непреднамеренной угрозой центру коммуникации, что критически отразится на работоспособности системы в целом.

Группировка поддерживает различные варианты маршрутизации между агентами, что позволяет обеспечивать доступность информации в акватории со сложным рельефом, а также определять лучший путь пакетов от агента к центру коммуникации. Примером таких алгоритмов являются: Алгоритм Беллмана-Форда, Алгоритм Дейкстры, Алгоритм Флойда-Уоршелла.

Рассмотрим факторы, относящиеся к техническим характеристикам самих агентов, которые влияют на работу агентов и площадь покрываемой поверхности: объём заряда АНПА, характеристика гидроакустической антенны, режимы работы АНПА.

Важным фактором является зона покрытия гидроакустической антенны, на которую будет влиять вид гидроакустической антенны, поскольку в зависимости от формфактора будет зависеть характеристика направленности антенной решетки. В работе рассматривается антенна с формфактором цилиндра, при котором площадь покрытия гидроакустической антенны в двумерной плоскости приближенно к кругу [2].

Поскольку моделирование ограничено временем, следует учитывать возможность окончания заряда батареи агентов, при превышении времени работы агентов прекращается получение информации в целом, если не заменить агентов на новые единицы. Необходимо принимать во внимание в каком режиме функционирует АНПА, а также его расположение в сети, взаимодействует ли он только с коммуникационным центром или ретранслирует информацию от соседних агентов.

Основной идеей данной работы является использование площади покрытия группировкой в качестве одного из показателей достоверности. По аналогии с наземными системами достоверность информации определяется покрываемой площадью агентами в зависимости от заданной, а также факторами, влияющими на целостность информации [3]. Рассмотрим задачу нахождения площади прямого наблюдения морской обстановки агентами, площадь будет зависеть от расположения агентов и связи между ними.

Если расстояние между центрами окружностей меньше или равно сумме их радиусов, то пересечение будет иметь форму «линзы», а если расстояние больше суммы радиусов, то пересечения не будет.

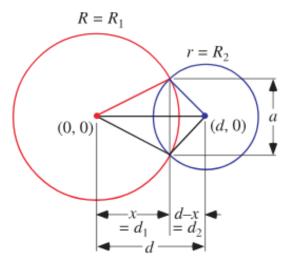


Рис. 2. Пересечение двух окружностей

Для расчета площади асимметричной «линзы», где пересекаются окружности, можно применить формулу для нахождения площади кругового сегмента, используя радиус и треугольную высоту. Для нахождения площади пересечения двух окружностей, формула расчета достаточно тривиальна, однако для трех и более окружностей нет универсальной формулы.

Один из способов решения задачи нахождения площади пересечения нескольких окружностей, разбить область пересечения на сегменты, каждый из которых может быть выражен через формулу пересечения двух окружностей. Затем площадь пересечения может быть найдена как сумма площадей всех сегментов.

После расчёта площади эффективного покрытия, необходимо присвоить коэффициент достоверности для каждого из сегментов. Например, при наблюдении объекта несколькими агентами коэффициент достоверности будет выше, однако общая зона покрытия акватории будет меньше. В результате получим оценку достоверности информации в определенной точке пространства в момент времени t. В зависимости от задачи, возможно изменять местоположение агентов, расширять площадь наблюдения группы, или повышать достоверность собираемой информации в нужном месте.

Обязательно стоит отметить фактор непреднамеренной угрозы. Непреднамеренные угрозы могут быть внутренними и внешними. Под внутренними подразумеваются технические нарушения работы агентов и центра коммуникации. В зависимости от положения и задачи группировки, данные угрозы могут значительно влиять на достоверность получаемой информации, например, при использовании цепочки агент — агент нарушение работы связующего агента между остальной группировкой и центром коммуникации приводит к полной потере получаемой информации.

Такие факторы, как гидрологоакустические условия и помехосигнальная обстановка могут помешать нормальному функционированию системы в районе выполнения задачи, в частности, при балле шторма 4, начинаются заметные проблемы получения достоверной гидролокационной информации агентами.

В ходе выполнения исследования были определены условия и ограничения для создания модели достоверности информации МАС АНПА и параметры в большей степени влияющие на достоверность информации. Следующий этап исследования модели достоверности информации в МАС АНПА подразумевает реализацию математической модели приведенных выше условий, а также выполнение модельных экспериментов, при которых исследуются параметры, влияющие на достоверность получаемой информации.

Список использованных источников

- 1. Кича И.В., Тимкин А.К. Факторы влияющие на системы безопасности в мультиагентной системе автономных необитаемых подводных аппаратов // XII Конгресс молодых учёных. Том 2. Электронное издание. 2023. С. 159—162.
- 2. Смарышев М.Д. Направленность гидроакустических антенн. Ленинград. Судостроение. 1973. С. 179–190.
- 3. Зикратов И.А., Зикратова Т.В. Оптимизация зоны покрытия систем сотовой связи на загородных участках местности методом стохастического программирования // Информационно управляющие системы. − 2008. − № 4. − С. 41.

UDC 004.492.3

OPTIMIZING DOS/DDOS DETECTION IN THE CICIDS DATASET USING ADVANCED MACHINE LEARNING

Hajjouz A. ¹(PhD student) Scientific Supervisor – Avksentieva E.Y.¹

1 – ITMO University

e-mail: abdulkaderhajjouz@gmail.com

With the escalating threats of DoS and DDoS attacks in cyber environments, advanced detection systems are imperative. This research utilized the combined datasets of CIC-IDS2017 and CSE-CIC-IDS2018, implementing the CatBoost Classifier for its proficiency in handling categorical data. Our objective was to assess the classifier's effectiveness in identifying malicious network activities among benign traffic. The study revealed the classifier's outstanding accuracy of 99.9831% Precision, recall, and F1-score metrics corroborated the model's robust performance, with a focused feature selection process enhancing its predictive capabilities.

Keyword

DoS, DDoS, Network Traffic Classification, Feature Selection, Machine Learning in Cybersecurity.

The increasing prevalence of Distributed Denial of Service (DoS) and Direct Denial of Service (DDoS) attacks highlights the critical need for advanced detection mechanisms. This study zeroes in on distinguishing between harmful DoS/DDoS attacks and benign network traffic. Utilizing the comprehensive CSE-CIC-IDS2018 and CIC-IDS2017 dataset [1, 2], this research deploys the CatBoostClassifier—a machine learning algorithm renowned for its high accuracy and efficiency in handling categorical data. The principal aim is to evaluate the efficacy of machine learning, with a focus on the CatBoostClassifier, in accurately identifying DoS and DDoS attacks amidst regular network activities. By comparing the performance of the CatBoostClassifier against other machine learning models, this study seeks to establish a robust framework for real-time, reliable detection of network threats, thereby contributing to the development of more secure cyber environments.

Related Work

In the domain of cybersecurity, the detection of DoS/DDoS attacks has been a focal point for researchers due to the severity and challenge these attacks pose in cloud and Internet of Things (IoT) environments. Two notable contributions to this field have been made by teams led by Saida Farhat and S. Manimurugan, respectively.

The first study by Farhat et al. evaluated several machine learning (ML) techniques for DoS/DDoS attack detection using the CICIDS2017 dataset. The team's research demonstrated that the XGBoost algorithm achieved a detection accuracy of 99.11%, outperforming Random Forest (RF) with 98.96%, Logistic Regression (LR) with 84.13%, and Naive Bayes (NB) with 80.84%. Their ML-based system showed promise in identifying attacks within cloud environments and highlighted the potential for future work that incorporates emerging ML strategies to combat a broader spectrum of cloud-based threats [3].

The second paper, authored by Manimurugan and Al-Mutairi, focused on securing the Internet of Medical Things (IoMT) smart environments. They developed a Deep Belief Neural Network (DBN)-based Intrusion Detection System (IDS) and evaluated it using the same CICIDS2017 dataset, encompassing a variety of attack vectors. Their DBN-IDS achieved an accuracy of 96.67%, surpassing the performance of Support Vector Machine (SVM) at 95.55%. This research not only delved into the dataset for a thorough performance evaluation but also provided a foundation for future expansions to detect additional attack types within IoT systems, along with potential applications in other areas such as classification and recognition tasks [4].

Both studies contribute valuable insights into the evolving landscape of cyber threat detection and open avenues for the integration of more sophisticated and varied ML techniques to strengthen the resilience of digital systems against a wide range of cyber-attacks.

Dataset

The CSE-CIC-IDS2018 dataset, a collaborative effort between the Communications Security Establishment (CSE) and the Canadian Institute for Cybersecurity (CIC) and CICIDS2017 dataset, was selected for its comprehensive representation of modern network traffic, encompassing a wide range of interactions from benign to malicious activities such as Distributed Denial of Service (DoS) and Direct Denial of Service (DDoS) attacks (Table 1). The dataset which contains 79 features, was utilized in this study. This selection was made to ensure a rich, multifaceted dataset that enables a nuanced approach to identifying and distinguishing between DoS/DDoS attacks and benign network behaviors.

Number of samples and network traffic in CTU dataset

Table 1

Dataset	TrafficType	Number of Samples
CSE-CIC-IDS2018	Benign	15757805
+	DDOS	1263933
CICIDS2017	DOS	906961

Features and Selection Techniques

Understanding the crucial role of feature selection, we evaluated correlations through the Spearman rank-order correlation coefficient, which was depicted using a heatmap for visualization. To decipher the structure within the features, hierarchical clustering was applied, utilizing the Ward linkage method.

Through this methodical process s, a refined subset of 32 features was determined to be optimal for the training of the model, following a thorough screening process.

Model Development and Optimization Using CatBoost for Botnet Detection

In this research, we focused on developing a model to differentiate between DoS/DDoS attacks and benign network traffic, employing a structured data preprocessing and partitioning strategy. By utilizing stratified sampling, we ensured a balanced class distribution, dividing the dataset into 80% for training and 20% for validation, which was further split equally for evaluation and testing.

For preprocessing, we transformed categorical variables using one-hot encoding to prepare the data for machine learning analysis. The CatBoost library's 'Pool' function was instrumental in managing the data effectively, setting up separate pools for training, evaluation, and testing.

The core of our research utilized the `CatBoostClassifier`, fine-tuned to our specific requirements. The model's configuration included 1300 iterations to avoid overfitting, a learning rate of 0.1 for robustness, and a depth of 3 to capture data complexities. We chose 'MultiClass' as the loss function to suit our multi-class classification task, and 'TotalF1' as the evaluation metric to address dataset imbalances. Other parameters like GPU acceleration, verbose logging, and class weights were optimized based on domain knowledge.

This carefully calibrated setup allowed us to train the model efficiently, with GPU acceleration speeding up the process. The model was validated and optimized to ensure it performed reliably on unseen data, demonstrating our approach's effectiveness in network threat detection through advanced machine learning techniques.

Results and Discussion

The CatBoost Classifier demonstrated exceptional performance in distinguishing between benign traffic and DoS/DDoS attacks (Table 2). The precision, recall, and F1-score metrics underscore the model's robust capability in accurate classification. Specifically, the model exhibited almost perfect precision for benign traffic at 0.999998 and an impressive recall at 0.999810, resulting in an F1-score of 0.999904. For DoS attack detection, the precision was very high at 0.999723, with a recall of 1.000000, culminating in an F1-score of 0.999862. The detection of DDoS attacks also showed

remarkable precision at 0.997087 and an almost perfect recall at 0.999967, with an F1-score of 0.998525.

The overall accuracy of the model reached 0.999831 across a total of 1,792,870 instances, showcasing its efficiency and reliability in identifying and classifying network traffic behaviors. These metrics not only reflect the high level of accuracy but also the model's ability to maintain this performance consistently across different types of network traffic, making it an excellent tool for threat detection in cybersecurity.

Result analysis

Table 2

	precision	recall	f1-score	support	
Benign	0.999998	0.999810	0.999904	1575781	
DOS	0.999723	1.000000	0.999862	126393	
DDoS	0.997087	0.999967	0.998525	90696	
accuracy			0.999831	1792870	

The CatBoost Classifier was employed to evaluate the influence of individual network characteristics on the identification of DoS, DDoS, and Benign traffic. By leveraging the built-in feature importance functionality of the model, we were able to compute and assign a relevance score to each feature based on its impact on the model's predictive precision. The features were then ranked from the most to the least influential, providing a clear hierarchy of feature significance. To aid in the visualization and interpretation of this data, a bar chart was created, illustrating the comparative significance of each feature. This visual aid is instrumental for prioritizing features in subsequent analyses and practical implementations (Table 3).

Comparison our result with other studies

Table 3

Ref Dataset Technique accuracy								
Kei	Dataset	Technique	accuracy					
[3]	CICIDS 2017	DBN	96.67					
[3]	CICIDS 2017	SVM	95.55					
[4]	CICIDS 2017	XGBoost	99.11					
[4]	CICIDS 2017	RF	98.96					
[4]	CICIDS 2017	LR	84.13					
[4]	CICIDS 2017	NB	80.84					
Our study	<i>CICIDS 2017 + CSE-CIC- IDS2018</i>	CatBoost	99.98					

Conclusion

This study has successfully employed the CatBoostClassifier to discern between DoS/DDoS attacks and benign traffic using an amalgamation of the CIC-IDS2017 and CSE-CIC-IDS2018 datasets. Our findings indicate that the CatBoostClassifier is highly effective in network threat detection, achieving an accuracy of 99.9831%, which is superior to other techniques reviewed in our related work. The research also highlights the importance of feature selection, where a subset of 32 features was identified as optimal for model training (Figure). The precision, recall, and F1-score metrics were near perfect, underscoring the model's strength in classification tasks. In comparison to other studies, our method demonstrates a significant improvement in detection accuracy, reinforcing the potential of CatBoostClassifier in cybersecurity applications. The bar chart of feature importance provides a valuable guide for future studies, emphasizing the most influential features in threat detection. As cyber threats evolve, this research serves as a benchmark for developing more advanced detection systems that can adapt to emerging challenges in the cybersecurity landscape.

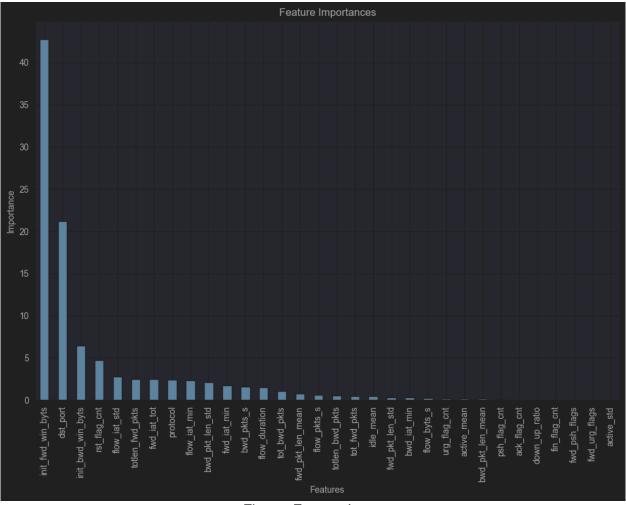


Figure. Feature Importance

References

- 1. A Realistic Cyber Defense Dataset (CSE-CIC-IDS2018) was accessed on 2023 from. [Electronic resource]. Access mode https://registry.opendata.aws/cse-cic-ids2018 (date of access: 13.01.2024).
- 2. Sharafaldin I., Lashkari A.H., Ghorbani A.A. Toward Generating a New Intrusion Detection Dataset and Intrusion Traffic Characterization // Proc. 4th International Conference on Information Systems Security and Privacy (ICISSP). 2018. Pp. 108–116.
- 3. Manimurugan S., Al-Mutairi S., Aborokbah M., Chilamkurti N., Ganesan S., Patan R. Effective attack detection in internet of medical things smart environment using a deep belief neural network // IEEE Access 8. 2020. Pp. 77396–77404.
- 4. Farhat S., Abdelkader M., Meddeb-Makhlouf A., Zarai F. Evaluation of DoS/DDoS Attack Detection with ML Techniques on CIC-IDS2017 Dataset // ICISSP. 2023. Pp. 287–295.

УДК 004.056.55

АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГОЛОСОВАНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПРИНУЖДЕНИЯ

Чапасов П.К. 1 Научный руководитель — ассистент Голованов $A.A.^1$

1 – Университет ИТМО

e-mail: petr.chapasov2002@gmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

Работа представляет собой аналитический обзор существующих протоколов электронного голосования с точки зрения защищенности от принуждения. Проблема принуждения считается одной из самых тяжело решаемых, а свойство непринуждаемости, решающее её, считается недостижимым с помощью криптографии. В работе приведено краткое описание и анализ протоколов электронного голосования, основанных на технологиях смешанных сетей, слепой подписи и гомоморфного шифрования, в том числе протокола, ставящего своей целью решение проблемы принуждения.

Ключевые слова

Проблема принуждения, свойство непринуждаемости, свойства голосования, анализ безопасности голосования, протоколы ДЭГ.

Электронное голосование – форма голосования с использованием компьютерных технологий при регистрации и подсчете голосов с целью обеспечения точности, скорости и удобства выборов. В настоящее время дистанционное электронное голосование применяется в таких странах, как Норвегия, Швеция и другие, и применяется там с 2016 года. В России электронное голосование в настоящее время находится в процессе внедрения. Так, в 2023 году в Москве были проведены выборы мэра с использованием технологии дистанционного электронного голосования (ДЭГ), а в марте 2024 года ДЭГ использовалось для проведения президентских выборов. Несмотря на то, что первые протоколы электронного голосования появились ещё в 1981 году, современные протоколы все ещё не идеальны относительно свойств безопасности и удобства. Поэтому необходимо провести анализ проблем существующих протоколов электронного голосования. У протоколов электронного голосования существуют общепринятые свойства: 4 свойства практичности (гибкость, эффективность, мобильность, удобство), 7 основных свойств безопасности (полнота, обоснованность, конфиденциальность избирателя, одноразовость, приемлемость, справедливость, проверяемость) и 7 расширенных свойств безопасности (надежность, атомарная проверяемость, универсальная проверяемость, отсутствие квитанций, непринуждаемость, декларируемость, возможность повторного голосования) [1].

В современной литературе принято делить свойство конфиденциальности электронного голосования на три уровня:

- 1. Конфиденциальность пользователя (Voter's Privacy) голос отдельного пользователя хранится в тайне.
- 2. Отсутствие квитанций (Receipt-freeness) система электронного голосования не возвращает избирателю никаких данных, которые могли бы указать на то, как тот проголосовал.
- 3. Непринуждаемость (Uncoercibility) устойчивость к принуждению, т. е. невозможность злоумышленника определить, соответствует ли избиратель, подвергнутый принуждению, его требованиям.

Принято считать, что свойство непринуждаемости невозможно реализовать с помощью криптографических примитивов [2]. Для решения данной проблемы предполагается

необходимость выполнения свойства отсутствия квитанций и невыполнения свойств мобильность и атомарная проверяемость, т. е. необходим контроль места проведения голосования и невозможность проверки избирателем своего голоса.

Протоколы электронного голосования широко используют следующие криптографические технологии: смешанные сети, битовые обязательства, публичные доски объявлений, гомоморфное шифрование, слепые подписи и доказательства с нулевым разглашением.

Первый протокол электронного голосования был предложен Дэвидом Чаумом в 1981 году [3]. Он был основан на технологии смешанных сетей. Весь протокол можно разделить на два этапа: сначала каждый избиратель регистрирует свой псевдоним у администратора, причем администратор не знает соответствие между пользователями и псевдонимами, после чего каждый избиратель отправляет свой голос под псевдонимом на публичную доску объявлений через смешанную сеть. Протокол не защищен от принуждения, так как принуждающий в момент голосования может заставить избирателя отдать голос определенным образом. Также на этапе регистрации злоумышленник может забрать у избирателя его псевдоним, после чего проголосовать самостоятельно.

В 2001 году Парк, Ито и Куросава предложили разделить голос пользователя пополам: на правую и левую часть, а смешанную сеть использовать для шифрования сообщения, а не расшифрования [3]. В конце голосования все узлы смешанной сети объединялись и вместе расшифровывали либо правые части голосов, либо левые. Если в расшифрованных частях не было ошибок, то расшифровывались оставшиеся части. Таким образом, было достигнуто свойство справедливости, т. е. никакие промежуточные результаты выборов никому не могут быть доступны. Однако проблема принуждения в протоколе никак не решается: по-прежнему возможно принудить избирателя голосовать определенным обозом, воздержаться от голосования, или забрать учетные данные у избирателя.

Ещё один протокол, основанный на смешанных сетях - протокол Техедор-Ромеро и других, опубликованный в 2021 году. Было предложено зациклить смешанную сеть и в качестве узлов использовать избирательные партии. Избиратель разделял свой голос и отправлял в смешанную сеть под псевдонимом на такой узел, чтобы расшифрованная часть попала партии, для которой была предназначена эта часть голоса. В конце все партии объединяются, для того чтобы восстановить целые голоса и подсчитать результат голосования. Данный протокол по-прежнему позволяет принудителю влиять на решение избирателя в момент голосования, однако у злоумышленника не получится забрать псевдоним у избирателя и проголосовать самому, т. к. избиратель голосует под личными данными. Далее в таблице представлены результаты анализа протоколов, основанных на смешанных сетях.

Следующий тип протоколов – протоколы, основанные на гомоморфном шифровании. Первый предложенный протокол - протокол Коэна и Фишера 1985 года [3]. Основная идея заключалась в том, чтобы все коммуникации шли через публичные доски объявлений: администратор выборов публиковал данные, необходимые для работы протокола и доказательства правильности этих данных, избиратели публиковали свои голоса и доказательства к ним, после чего администратор проверял доказательство к каждому голосу, суммировал их и расшифровывал. Данный протокол позволял произвести всего одну операцию расшифровывания после подсчета суммы, однако ОН не гарантировал конфиденциальности, т. к. администратор выборов мог расшифровать каждый голос отдельно. Таким образом, принуждающий, договорившись с администратором, может иметь полный доступ к голосам избирателей и подвергать их принуждению.

Протокол Хирта и Сако, предложенный в 2000 году, предлагал следующую идею: все администраторы выборов имеют части закрытого ключа. В начале выборов есть набор разрешенных голосов. Каждый избиратель приходит в место с физически выделенным каналом для голосования, где каждый администратор последовательно перемешивает и перешифровывает разрешенные голоса и доказывает избирателю, что голоса перемешаны и перешифрованы без потерь. В конце избиратель выбирает голос, который соответствует его

выбору и публикует его. На этапе подсчета все администраторы объединяются для расшифровки суммы голосов. Данный протокол обеспечивает свойство отсутствия квитанций, т. к. даже если избиратель запишет квитанцию (последовательность перемешиваний), он не сможет доказать злоумышленнику её правдивость. Несмотря на это, протокол не исключает возможность злоумышленника принудить избирателя, пришедшего в место с выделенным каналом, проголосовать определенным образом или вовсе воздержаться от голосования.

Результаты анализа протоколов

Таблица

Свойства протокола		Смешан-		Гомоморф- ное шифрова- ние		Слепые подписи			Изменение голоса		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Гибкость	+	+		±	±		+		+	+
Требования к	Эффективность	+	+		+	+	+	+	+	+	
практичности	Мобильность	+	+	+	+		+	+		±	+
	Удобство	+	+	+	+	+	+				
	Надежность					+					
	Атомарная проверяемость	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Расширенные требования к	Универсальная проверяемость	+	+	+	+	+	+	+		+	+
безопасности	Декларируемость	+	+								
	Возможность повторного								+		+
	голосования										
	Полнота	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Обоснованность	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+
Основные	Одноразовость	+	+	+	±	+	+	+	+	+	+
требования	Приемлемость	+	+	+		+	+	+	+	+	+
безопасности	Справедливость		+	+		+	+	+			+
	Проверяемость			+	+		+				±
Конфиденциаль- ность	Конфиденциаль- ность избирателя	+	+	+		+	+	+	+	+	+
	Отсутствие квитанций	+	+			+			+		+
	Непринуждаемость										+

Примечание:

1 – протокол Чаума; 2 – протокол Парк и др; 3 – протокол Техедор-Ромеро и др.; 4 – протокол Коэна и Фишера; 5 – протокол Хирта и Сако; 6 – протокол Фэна и др.; 7 – протокол Фудзиоко и др.; 8 – протокол Ся и Шнайдера; 9 – протокол Лопес Гарсия; 10 - протокол Лохера и др.; "+" – свойство выполняется полностью; "±" – свойство выполняется частично

Протокол Фэна и остальных, предложенный в 2019 году. Идея протокола в том, что закрытый ключ разделен между администраторами. Каждый избиратель создает шифроподпись голоса, т. е. одновременно шифрует и подписывает голос, и выкладывает их на публичную доску объявлений. Администраторы суммируют все голоса, проверяют подпись суммы голосов, которая должна включать в себя только подписи избирателей, которым разрешено голосовать, и расшифровывают результат выборов. Этот протокол сохраняет идею протокола Коэна и Фишера и добавляет свойство приемлемости, т. е. голосовать могут лишь те, кому разрешено, и свойство конфиденциальности избирателя, разделив секретный ключ между администраторами. Протокол никак не решает проблему принуждения, так как злоумышленник имеет точно такие же возможности по принуждению, как и в протоколе Коэна и Фишера. Результаты анализа протоколов, основанных на гомоморфном шифровании, представлены в таблице.

Следующим этапом развития протоколов электронного голосования стали протоколы, основанные на слепой подписи. Первый из них - протокол Фудзиоко, Окамото и Ото 1992 года [3]. Протокол можно разбить на три этапа: заверение избирателем бюллетеня у администратора с помощью слепой подписи, отправление заверенного бюллетеня с битовым обязательством счетчику по анонимному каналу и отправка ключа от битого обязательства избирателем, если он обнаружил свой бюллетень на публичной доске объявлений по анонимному каналу. В данном случае злоумышленник сможет принудить избирателя проголосовать определенным образом лишь на этапе регистрации бюллетеня, однако у него появляется больше шансов для того, чтобы принудить избирателя воздержаться от выборов.

Алгоритм Ся и Шнайдера, предложенный в 2006 году, развивает идею протокола Фудзиоко, Окамото и Ото: все этапы идентичны, однако битовое обязательство к бюллетеню можно открыть разными ключами, что обеспечивает свойство отсутствия квитанций. Несмотря на это, все способы принуждения из предыдущего протокола остаются и в этом.

Лопес Гарсия в своем протоколе 2016 года предложил с помощью слепой подписи заверять у администратора псевдоним, под которым далее избиратель анонимно голосует в свободном формате. Данная идея добавила протоколу свойство гибкости, однако злоумышленник все ещё может принудить избирателя голосовать определенным образом, воздержаться от выборов или вовсе отобрать учетные данные для голосования. Результаты анализа протоколов, основанных на слепой подписи, представлены в таблице.

Отдельное внимание необходимо уделить протоколу Лохера, Хайни, Кёнега 2016 года [4]. протоколе избиратели регистрируют свои публичные ключи у администратора, администратор формирует данные для проверки: входит ли открытый ключ в разрешенные без его раскрытия. Далее каждый избиратель выкладывает на доску два битовых обязательства, гарантирующих соблюдение открытых и закрытых ключей с возможностью открыть обязательство разными ключами. Вместе с обязательствами избиратель выкладывает зашифрованный голос и доказательства с нулевым разглашением, что обязательства, бюллетень и шифротекст сформированы правильно. В любой момент до окончания голосования избиратель может выложить новый голос, сформировав новые обязательства, шифротекст и доказательства. Далее счетчики совместными усилиями проверяют данные, отделяют шифротексты от обязательств, сортируют все шифротексты, оставляя последний от каждого избирателя, расшифровывают и публикуют результат. Таким образом, благодаря тому что единственные данные, указывающие на пользователя – публичный ключ, находящийся в битовом обязательстве, которое может быть раскрыто разными способами, и благодаря тому, что избиратель в любой момент может переголосовать, даже если злоумышленник принудит избирателя голосовать определенным образом, всегда есть возможность изменить голос, и злоумышленник не узнает об этом. Единственный способ принудить избирателя - отобрать у него идентификационные данные, но и это не гарантирует злоумышленнику, что избиратель не изменит голос перед самым концом выборов. Таким образом, протокол выполняет свойство непринуждаемости, однако теряются свойства эффективности, так как сортировка голосов является вычислительно сложной задачей, и надежности, так как любой избиратель может устроить DoS-атаку. Результат анализа протокола, позволяющего изменить голос, представлен в таблице.

Таким образом, несмотря на общепринятое мнение, проблему принуждения в электронном голосовании можно решить с помощью средств криптографии. Однако на данный момент не существует протокола, который обеспечивал бы свойства непринуждаемости, не теряя при этом других свойств. Результаты исследования планируется использовать для дальнейшей работы по решению проблемы принуждения вместе с сохранением других свойств электронного голосования.

Список использованных источников

1. Røsland G. Remote Electronic Voting // Hovedoppgave, University of Bergen, Norway. – 2004. – C. 10–12.

- 2. Review of Cryptographic Schemes applied to Remote Electronic Voting systems: remaining challenges and the upcoming post-quantum paradigm. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/math-2018-0013/html?lang=en (дата обращения: 19.02.2024).
- 3. A Review of Cryptographic Electronic Voting. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mdpi.com/2073-8994/14/5/858 (дата обращения: 09.02.2024).
- 4. Locher P., Haenni R., Koenig R. E. Coercion-resistant internet voting with everlasting privacy // Financial Cryptography and Data Security: FC 2016 International Workshops, BITCOIN, VOTING, and WAHC, Christ Church, Barbados, February 26, 2016, Revised Selected Papers 20. Springer Berlin Heidelberg, 2016. Pp. 161–175.

УДК 004.056.55

ТЕХНОЛОГИЯ БЛОКЧЕЙН В ПРИМЕНЕНИИ К УСТРОЙСТВАМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ

Черемухин Д.Н.¹ (студент) Научный руководитель – ассистент Федоров И.Р.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: cheremukhin.dmitrij@gmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИР «Разработка алгоритма консенсуса для применения в сетях Интернета вещей на основе технологии блокчейн».

В обзоре рассматривается применение технологии блокчейн для объединения в сеть устройств Интернета Вещей. Сети блокчейн используются в этих системах с целью повысить безопасность данных устройств и пропускной способности сети. В работе были освещены основные свойства сетей блокчейн, важные для систем умных устройств, нелинейная структура объединения блоков и современные решения сетей.

Ключевые слова

Технология распределенного реестра, консенсус, ацикличный направленный граф, свойства блокчейн, фреймворк, Интернет Вещей.

История разработки сетей блокчейн

Сложно недооценить влияние технологии распределенного реестра (Distributed Ledger Technology – DLT) на индустрию электронных устройств и аппаратуры. На момент 2024 года многие корпорации поучаствовали в развитии DLT и внедрении её во множественные системы по всему миру – в их числе Hitachi, NTT Data, Intel, Hyundai. Технология распределённого реестра продолжает развиваться и в настоящее время, при этом многие её возможности до сих пор не реализованы – например, хранение цифровой личности.

Будучи разновидностью технологии DLT, блокчейн представляет собой децентрализованный распределённый цифровой реестр, особенность которого в использовании криптографических алгоритмов для достижения большей безопасности и эффективности взаимодействия участников. Блокчейн следует рассматривать как более качественную версию технологии DLT, в том смысле что он позволил достигнуть доверия и конфиденциальности в системах без участия доверительного центра.

Сеть блокчейна представляет собой полный реестр всех проведённых и подтверждённых операций между участниками этой сети, иначе называемых транзакциями. Первой блокчейнсетью по праву можно считать Bitcoin, описанный в 2009 году неизвестным разработчиком под псевдонимом С. Накамото. Именем разработчика также назван вид принятия решений в сети, консенсус Накамото, который означает, что единственно верной цепью блоков в сети является самая длинная. Bitcoin стал первой цифровой валютой, использующей принципы неизменяемости проведённых действий в сети, протокол цифровой подписи для подтверждения доверия к узлам, и алгоритм достижения консенсуса для децентрализованного построения сети. Но также Bitcoin стал отправной точкой для исследования сетей блокчейн с целью раскрыть их потенциал. Являясь сетью блокчейн первого поколения, разработка Накамото хранила и изменяла информацию о пользователях в виде баланса на их кошельке, а смарт-контракты были реализуемы только с использованием неполного Тьюринг-языка и были встроены в код сети изначально. Второе поколение ввело возможность разработки приложений в сетях блокчейн, третье поколение специализируется на технологиях масштабирования и повышения производительности.

Хотя Биткоин считается первым блокчейном, идеи, заложенные в его основу, не были чемто новым на 2009 год. Алгоритм консенсуса Proof-Of-Work (PoW), основанный на доказательстве выполнения расчёта некоторого математического значения, был предложен в 1992 году авторами С. Дворк и М. Наор как средство защиты от рассылки спама на электронную почту. В этой статье вводилось понятие экономического сигнала¹, который позволяет получателю сделать предположение, не доверяя отправителю. В 2002 году А. Бэком была развита концепция функции со стоимостью² или функции, которую легко верифицировать, но дорого вычислить. Система HashCash, предложенная Бэком, использовала функцию со стоимостью, основанную на хэшировании множества строчек, чтобы найти частичную коллизию с необходимым значением хэша.

Дальнейшие реализации блокчейна основывались добавлении различных на технологических возможностей этой технологии. Система Ethereum стала первым блокчейном, позволяющим писать смарт-контракты на Тьюринг-полном языке, а следовательно, и разрабатывать децентрализованные приложения. Решение ZCash развивает технологию доказательств с нулевым знанием, которая позволяет проводить более конфиденциальные операции в сети, по сравнению с сетью Биткоин. Проект Ripple – это сеть публичного которая отошла от свойства полной децентрализованности в пользу блокчейна, масштабируемости. В общем плане, каждая современная реализация блокчейна основывается на одном или двух свойствах из трилеммы блокчейна – масштабируемость, децентрализация, конфиденциальность, - при этом ни одна сеть не может одновременно удовлетворять всем трем свойствам.

Свойства, определяющие сети блокчейн

Блокчейн – децентрализованная система. Это значит, что состояние сети и информацию о нем хранят множество устройств вместо единственного сервера. Это позволяет исключить цензуру, свойственную для архитектуры сети с несколькими уровнями пользователей, и позволяет вносить предложения об изменении исходного кода каждому желающему разработчику. С другой стороны, с момента появления Bitcoin прошло немало времени, и в последние годы блокчейн стал рассматриваться не только как средство построения цифровой валюты, но и как технология, применяемая для задач документооборота, облачных вычислений, управления поставками, в реализации которых зачастую требуется ограничить участников сети до некоторого доверенного круга.

В связи с вышеописанным сети блокчейн разделяются на три больших категории: публичные, приватные и смешанные³. Публичной сетью можно назвать любую криптовалюту или среду разработки децентрализованных приложений, которые находятся в публичном доступе. Обычно в публичных сетях добавлены токены, как средство поощрять действия пользователей по изменению состояния сети, и как мера стоимости действий в сети, чтобы избежать DoS-атак и прочего вредительского поведения участников. При этом публичные сети зачастую подвергаются атакам, приводящим к большим материальным потерям разработчиков сети или её участников: атаке 51 (пятидесяти одного) процента, при которой участник, имеющий вычислительную мощность, превышающую сумму мощностей всех остальных участников, получает полный контроль над подтверждением действий в сети; атакам с использованием уязвимостей в открытом исходном коде (только за 2024 год из-за эксплойтов в исходном коде были атакованы протоколы Gamma Strategies, Radiant Capital, распределенные приложения Wise Lending и Goledo Finance, с общей суммой потерь в 11 миллионов долларов). В условиях, требующих хранения информации о распределённом реестре состояний сети в узком кругу лиц, например, в некоторой организации, а также в условиях, требующих большей безопасности вложенных в сеть средств, используются приватные сети. В зависимости от реализации, участникам может требоваться разрешение на доступ к информации, либо только

¹ В оригинале strong economical signal или value-signal, сигнал, переносящий некое значение

² В оригинале cost-function

³ Permissioned, permissionless, open-permissioned, категория сети определяется разрешением на присоединением к ней

на изменение информации. Во втором случае, если просмотреть информацию может любой участник сети, но изменять её может только ограниченный круг пользователей, сеть относится к смешанной категории.

Постоянство — один из наиболее важных критериев оценки сети блокчейн. Масштабируемость и производительность сети тесно связаны с её постоянством или, иначе говоря, последовательным изменением внутреннего состояния сети. Это означает, что каждый из элементов сети должен иметь одну и ту же информацию о каждом состоянии сети. Сеть Вітсоіп и другие реализации сетей блокчейн с консенсусом Накамото работают в условиях строгого постоянства — каждое устройство в сети хранит такую же историю принятых решений в реестре, как и все остальные. Системы, поддерживающие выполнение смарт-контрактов, опираются также на условия строгого постоянства. С другой стороны, в некоторых сетях возможно частичное постоянство — то есть решение каждой ноды известно только нодам, связанным с ней. Это используется в сетях, где транзакция подтверждает не все предыдущие транзакции, а только несколько из них. Примером служит консенсус Tangle в сети ІОТА [1]. На самом деле критерий постоянства появился задолго до блокчейна, в машинах с реплицированным состоянием, о которых пойдет речь позже.

Второе свойство, описывающее сети блокчейн, - свойство упорядочивания. Свойство упорядочивания определяет, как элементы организованы в сети. Существует два подхода к добавлению новых транзакций в сеть: топологический и линейный. Топологический порядок означает, что транзакции можно представить как вершины направленного графа. Линейный порядок — представляет транзакции тоже как вершины графа, но уже не просто направленный, а полностью линейный, то есть граф в виде цепи.

Третье свойство – окончательность. Это наиболее важное свойство из описанных с точки зрения безопасности, потому что определяет неизменяемость какой-либо транзакции в сети. Биткоин и все сети, основанные на консенсусе Накамото, обладают вероятностной окончательностью, то есть после добавления транзакции (или блока транзакций) в сеть есть вероятность, что она будет отброшена позже. В таком случае окончательность каждой транзакции определяется некоторым кумулятивным параметром: её глубиной, весом или любым другим значением, зависящим от количества подтверждающих эту транзакцию элементов. С другой стороны, сети, которые не используют принцип выбора наиболее длинной цепочки блоков, обладают детерминированной окончательностью – после того как транзакция была подтверждена, она уже не может быть выброшена из реестра.

Далее будут рассмотрены реализации технологии распределённого реестра в системах Интернета вещей. Стоит понимать, что зачастую эти системы обладают детерминированной окончательностью, частичным постоянством и топологическим порядком. Это связано с тем, что система устройств IoT обычно состоит из нескольких серверов, хранящих информацию, и множества датчиков, передающих информацию. Сеть одного сервера не всегда связана с сетью любого другого, но при этом записанные изменения должны сохраняться — иначе, если датчик покинет сеть слишком рано, предложенная им транзакция будет утеряна окончательно.

Использование технологии распределённого реестра в системах интернета вещей

Перед построением любой сети с использованием технологии распределённого реестра стоит ответить на вопрос — зачем в системе требуется DLT?

Система Интернета вещей в общем виде представляет собой некую совокупность вычислительных устройств, обрабатывающих и передающих информацию об окружающей их среде, и серверов, которые собирают эту информацию для пользователя системы. Устройства в сети могут поддерживать как протоколы, обеспечивающие взаимодействие «клиент»-«сервер», так и протоколы, обеспечивающие взаимодействие «публикующий»-«подписчик». Последнее взаимодействие подходит для связи устройств в децентрализованной сети, где каждое устройство может как передавать, так и собирать информацию.

В реалиях системы Интернета вещей каждое изменение информации о состоянии этой системы может потребовать хранения в неком хранилище. Запись этой информации может выполняться сразу несколькими агентами, поскольку в такой системе может быть несколько

устройств, выступающих в роли сервера (или получателя данных). Наконец, в зависимости от системы, устройства могут проходить обязательную регистрацию либо свободно присоединяться к сети и отключаться от неё в произвольный момент времени. Таким образом, требуется сеть, которая сохраняет свое состояние и историю его изменений, с несколькими потенциальными авторами записей, и позволяет разные уровни открытости для новых участников. Набор этих условий позволяет использование систем приватного или смешанного блокчейна.

Особенности консенсуса в сетях интернета вещей

Алгоритмы консенсуса часто упоминаются в контексте машин с реплицированным состоянием [2]. В этом случае машина состояния — это набор серверов, которые работают с идентичными копиями одного состояния и могут продолжать работу, несмотря на потерю некоторых из серверов. Машины реплицированного состояния используются для решения проблем устойчивости к ошибкам в сетях блокчейн.

Машины реплицированного состояния обычно реализуются с использованием реплицированного журнала событий. Каждый сервер хранит собственный журнал событий, описывающий последовательность событий в порядке их выполнения сервером. Последовательность событий должна совпадать в журналах всех серверов, то есть все серверы должны выполнять эти команды в одном порядке. Задачу алгоритма консенсуса можно свести к поддерживанию постоянства реплицированного журнала.

В условиях нескольких серверов, хранящих общее состояние системы в виде журнала событий в ней, используются алгоритмы консенсуса RAFT, Paxos и другие. Систему Интернета вещей можно представить как совокупность нескольких серверов, получающих информацию с маломощных устройств и записывающих их в неких журнал, совпадающий для всех серверов. Существует ряд фреймворков, на основе которых могут строиться сети блокчейн для таких систем.

Тепdermint – фреймворк, ориентированный на разработку приложений, используемый в приватных сетях. Движок консенсуса, Tendermint Core, проверяет, что все транзакции в сети записываются в единственном порядке, при этом транзакции могут обрабатываться на любом языке программирования, благодаря Application Blockchain Interface (ABCI). Преимущество такого подхода в том, что фреймворк может использоваться как встраиваемая технология для замены движка другой сети блокчейн.

Сети блокчейн на ядре Tendermint достигают высокого постоянства (иначе говоря, коллизии между транзакциями происходят реже, чем в других сетях), поскольку в них используются два метода достижения консенсуса. Первый, proof-of-stake, используется для динамического выбора набора валидаторов для новых блоков, а второй, вариант Practical Byzantine Fault Tolerance, определяет блок для добавления в сеть. Блоки подтверждаются набором действий, представляющих из себя выбор предлагающего блок участника, голосования за честность блока среди валидаторов и решения о подтверждении блока. Участники распределяют свои транзакции между другими участниками, используя протокол gossip, при этом протокол Peer Exchange делает возможным получение только уникальной информации каждым участником.

Фреймворк SawTooth, являющийся разработкой компании Hyperledger, предлагает построение приватных и публичных решений. Он использует механизмы другого фреймворка от той же компании, Fabric, для построения связей между участниками, но позволяет разработчикам редактировать алгоритм консенсуса «на лету». Кроме того, фреймворк поддерживает любые смарт-контракты, написанные на Solidity, языке Ethereum, а также предлает REST API и SDK для языков Java, C++, Python и других, поэтому является более гибким фреймворком, чем Fabric. Стоит заметить, что, хотя SawTooth позволяет редактировать алгоритм консенсуса без хард-форка, полностью перейти на другой алгоритм не представляется возможным.

Еще один фреймворк, Corda, — это решение, обладающее высокой масштабируемостью и способное добиться консенсуса в условиях множества маломощных устройств. Это фреймворк

приватной сети, участникам которой в соответствие устанавливается сертификат X.509, подписываемый сервисом Doorman. Особенность решения в том, что информация о транзакции доступна только нодам, имеющим непосредственное отношение к этой транзакции. Таким образом, при обработке транзакций в сети, построенной на Corda, формируется структура Hash-DAG (направленный ацикличный граф хэшей). При входе в сеть устройство получает сертификат и доступ к сервису сетевого отображения, иначе говоря, таблицу соответствия IP-адресов сертификатам X.509.

Сеть на основе Corda представляется в виде машины состояний. Каждая транзакция поглощает предыдущее состояние, проверяется на уникальность набором нод notary и производит новое состояние. В сети сохраняется соответствие: notary – транзакция.

Очевидно, что алгоритмы принятия решений в системах Интернета вещей, должны обладать гибкостью, невысокими требованиями к производительности. Поэтому используемые фреймворки зачастую поддерживают несколько языков программирования и возможность устройств подключаться и отключаться от сети без воздействия на неё.

Особенности упорядочивания транзакций

При описании фреймворка Corda была упомянута структура транзакций Hash-DAG. На деле многие современные решения, применяющиеся в системах Интернета вещей, формируют из транзакций или блоков структуру направленного ацикличного графа (DAG или BlockDAG). В список таких решений входят IOTA, Graphchain, Phantom и многие другие.

Упорядочивание транзакций в структуре DAG отличается от структуры блокчейн. Иначе говоря, в сети блокчейн, предложенной Накамото, транзакции упорядочивались одна за другой, при этом каждая следующая зависела от предыдущей. В BlockDAG же для добавления новой транзакции используются различные алгоритмы упорядочивания: алгоритм выбора вершины, рекурсивный алгоритм, консенсус BFT-стиля, варианты консенсуса Накамото.

Нелинейное объединение транзакций будет рассмотрено на примере работы структуры Tangle [1], используемой в сети IOTA (рисунок [1]). Tangle уходит от технологии блокчейн тем, что обрабатывает каждую транзакцию индивидуально, без объединения в блоки, и использует структуру направленного ацикличного графа. Безопасность реестра в системе IOTA поддерживается каждым пользователем: каждая новая транзакция подтверждает две ранее добавленные. При этом из стандартного представления сети блокчейн сохранилась генезистранзакция: исторически первая транзакция, привязанная к аккаунту, владеющим на тот момент всеми токенами, которая прямо или посреднически подтверждается каждой новой транзакцией. Присутствие генезис-транзакции и подтверждение каждой транзакции новыми означает, что токены не могут создаваться «из ничего».

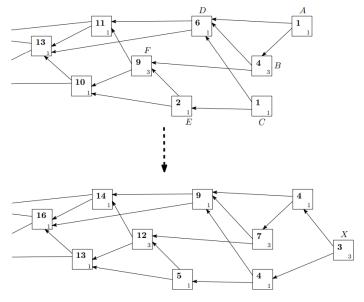


Рисунок. Структура транзакций Tangle

Транзакции в Tangle, которые еще не были подтверждены, называются вершинами (не путать с вершинами графа). Очевидно, что при отказе от линейной структуры должен существовать алгоритм, по которому выбираются вершины для подтверждения. Иначе говоря, каждая вершина должна иметь некую вероятность быть подтвержденной следующей транзакцией. При этом равномерное распределение небезопасно — оно открывает возможность для двойной траты токена. Конкретно в случае Tangle алгоритм выбора вершины основывается на весе вершины — значения, определяющего количество работы ноды, потраченной на эту транзакцию. Чем больше вес, тем выше вероятность подтверждения этой вершины, при этом каждая транзакция имеет также кумулятивный вес: сумма её собственного веса и весов всех транзакций, подтверждающих её. Кумулятивный вес используется для защиты от атаки с генерацией паразитных цепей: если некая транзакция сильно отличается по своему кумулятивному весу от других транзакций на том же уровне графа, то она считается мошеннической. В итоге, благодаря весу транзакции, количество вершин в сети сохраняется приблизительно постоянным в каждый момент времени, и все честные транзакции с большой вероятностью будут подтверждены.

Сравнение решений для интернета вещей

Реализаций сетей блокчейн для систем Интернета вещей с каждым годом становится все больше. Они отличаются наличием валюты, алгоритмами в их основе, публичностью и другими пунктами. Далее будут рассмотрены несколько практических решений в сфере Интернета вещей.

GHOST [3] – алгоритм, предложенный для улучшения структуры блокчейн, а конкретно сети, используемой в валюте Bitcoin. Является первой реализацией сети блоков, в которой элементы связываются не в одну цепь, а в множество деревьев, корнями которых являются блоки цепи. Иначе говоря, в сети, работающей по алгоритму GHOST, блоки, не вошедшие в главную цепочку, также являются валидными и информация о них известна всем участникам. В работе, предлагающей алгоритм GHOST, рассматриваются две проблемы сети Bitcoin: слабость перед атакующим с высокой вычислительной мощностью и малая скорость подтверждения новых транзакций. Подтверждение блоков в виде последовательности деревьев позволяет увеличить порог, при котором сеть становится уязвимой к мощному атакующему: если в сети Bitcoin из-за задержек между пользователями атака 51% на деле могла использоваться злоумышленником даже при обладании меньшей частью общей мощности, в новом решении атакующий должен иметь строго больше мощности, чем у всех остальных участников сети. Еще одним преимуществом предложенной системы стала большая детерминированность окончательности сети. Заметно уменьшился промежуток времени, который должен пройти, прежде чем изменения в сети станут необратимыми. Кроме того, повысилась и частота генерации транзакций в сети: 214 транзакций в секунду вместо 10 в Bitcoin.

Еще одна сеть, идеей которой стало улучшение сети Bitcoin — это Prism, деконструирующая алгоритм консенсуса. Авторы разбили алгоритм консенсуса на три части — генерация транзакций, выбор лидера, подтверждение — и разделили все блоки в сети на три цепочки, соответствующие этим трем частям. Деконструкция алгоритма консенсуса позволяет достигнуть пределов производительности отдельных компонентов сети, а следовательно, и самой сети в целом. Частота добавления блоков в сети блокчейн теоретически ограничена сверху только значением задержки между отдельными участниками этой сети, но на практике к ограничениям также добавляется и свойство окончательности. В случае же, когда разные блоки отвечают за разные функции в сети, скорость добавления транзакций возрастает, потому что случайный характер окончательности становится менее значимым.

Попыткой уйти от консенсуса Накамото и, соответственно, связанными с ним энергозатратами, которые требуются для алгоритма proof-of-work, при этом сохранив линейность структуры блоков, стала сеть Hashgraph [4]. Hashgraph использует виртуальное голосование и византийское соглашение в построении сети. Первое становится возможным благодаря протоколу gossip about gossip: каждое устройство при получении информации об изменениях в сети отправляет полную историю всех изменений случайному соседу. История

изменений в сети у двух устройств может отличаться, но остается последовательной, поэтому каждое событие рано или поздно станет известно каждому участнику. Сосед, получающий информацию, предполагает, за какое изменение проголосовало устройство, отправившее сообщение, и добавляет это изменение в свою историю. Таким образом, виртуальное голосование позволяет устройствам получать информацию без обмена дополнительными сообщениями, при этом соблюдая безопасность в сети: злоумышленник не может подмешать голос за неправильное изменение, потому что голоса создаются на стороне принимающей ноды. Византийское соглашение же используется в сети Hashgraph во избежание конфликтов в сети: чтобы изменение стало принятым, оно должно быть потомком изменений в цепях 2/3 участников сети. Итоговый вид сети Hashgraph представляет собой множество участников, каждый из которых обладает собственной линейной цепочкой блоков и передает известную информацию о состоянии сети своим случайным соседям.

Еще одна сеть, использующая BFT-консенсус, — сеть Phantom [5]. Phantom достигает высокой надежности и скорости обработки транзакций, определяя среди всех блоков часть корневых блоков. Блок становится корневым, если наследует 2\3 всех предыдущих корневых блоков, после чего, если корневой блок получает 2\3 голосов от пользователей, он включается в основную цепь. В контексте сети Phantom основная цепь — это часть подтвержденных блоков, которая выделяет основные события в сети и явно хранит их порядок. Как и все предыдущие рассмотренные сети, Phantom позволяет повысить скорость генерации транзакций и является более стойкой к атакам, по сравнению со стандартными реализациями сетей блокчейн.

Результаты обзора

В ходе обзора были рассмотрены несколько современных реализаций сетей блокчейн, которые могут использоваться в системах Интернета Вещей. Стоит отметить, что каждая из рассмотренных сетей использует нелинейную структуру добавления блоков, BlockDAG, причиной этому служит то, что в системах Интернета Вещей зачастую присутствует множество устройств, которые могут передавать информацию и отключаться от сети, не дожидаясь подтверждения транзакции. В этих условиях сети blockDAG, использующие византийское соглашение, позволяют транзакциям не отбрасываться из сети из-за конфликтов.

Рассмотренные сети обладают пропускной способностью, достаточной для работы множества устройств, благодаря использованию избыточности и уменьшению объема информации, обрабатываемой каждым устройством. Различные реализации, то есть Hashgraph, GHOST и прочие, по-разному распределяют нагрузку на подключенные устройства, и позволяют маломощным узлам быть полноценными участниками консенсуса. Возвращаясь к трилемме блокчейна, можно сделать вывод, что в рассмотренных реализациях сетей преобладают свойства масштабируемости и конфиденциальности. Децентрализованность же, хотя и является неотъемлемой их частью, реализована не полностью: решения об изменении внутреннего состояния сети принимаются небольшой группой одноранговых устройств, обладающих достаточной мощностью, а не всеми участниками сети.

- 1. Popov S. The Tangle // White paper. -2015. Pp. 1-28.
- 2. Schneider F.B. Implementing Fault-Tolerant Services Using the State Machine Approach: A Tutorial // ACM Computing Surveys. − 1990. − V. 22. − №. 4. − Pp. 299–319.
- 3. Sompolinsky Y., Zohar A. Accelerating Bitcoin's Transaction Processing // IACR Cryptology ePrint. 2013. Pp. 1–31.
- 4. Baird L. The Swirlds Hashgraph Consensus Algorithm: Fair, Fast, Byzantine Fault Tolerance // Swirlds, Inc. Technical Report. 2016. V. 1. Pp. 1–28.
- 5. Choi S., Park J. Nguyen Q., Cronje A. Fantom: A Scalable Framework For Asynchronous Distributed Systems // A Preprint. 2018. Pp. 1–37.

УДК 004.056

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ И СЕТЕЙ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Чернов Р.И.¹, Горошков В.А.¹, Островский Д.П.¹ Научный руководитель – д.т.н., доцент Гришенцев А.Ю.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: aeijo@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР №623106 «Автономные интеллектуальные системы».

Осуществлен обзор и анализ существующих систем и сетей связи через линии электропередачи. Выполнен анализ принципов работы систем и сетей связи через линии электропередачи, в том числе систем учета потребления электроэнергии и передачи телеметрии. Выявлены проблемы информационной безопасности систем и сетей связи через линии электропередачи.

Ключевые слова

Высокочастотная связь, информационная безопасность, линии электропередачи, телеметрия, информационная инфраструктура.

Актуальным направлением исследований являются исследования в области информационной безопасности телекоммуникационных систем и сетей в электроэнергетике. Актуальность определена имеющимся противоречием, заключающемся в том, что сети и системы связи через линии электропередачи — системы высокочастотной связи по линиям электропередачи, автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии и другие — являются объектами информатизации и, в ряде случаев, объектами критической информационной инфраструктуры, однако информационной безопасности таких систем уделено недостаточно внимания, тема не проработана, в открытой литературе вопрос обеспечения информационной безопасности подобных систем освещен недостаточно.

Безопасность и надежность систем и сетей связи через линии электропередачи сводится к физической охране и организационным мерам, обеспечивающим правильную эксплуатацию и своевременное обслуживание таких систем. Исследование направлено на восполнение данного пробела.

Автоматизированные системы контроля и учета электроэнергии являются многоуровневыми иерархическими, автоматизированными системами, предназначенными для измерения количества электроэнергии и величин ее параметров — тока, напряжения, мощности и других, автоматизированного сбора и передачи результатов измерений по коммуникационным каналам на верхний уровень, с последующим хранением и использованием.

Высокочастотная связь по линиям электропередачи обеспечивается программноаппаратным комплексом оборудования связи, использующего в качестве среды передачи информации провода и кабели высоковольтных линий электропередачи от 35 кВ и выше [1-3]. Каналы высокочастотной связи по линиям электропередачи используются для нужд электростанций и подстанций, для передачи голосовой связи, сигналов релейной защиты, противоаварийной автоматики, высокочастотной защиты, определения местоположения обрывов и оледенения линий электропередачи.

Широкое распространение данный вид связи получил благодаря низкой стоимости, экономичности, низким эксплуатационным расходам. Другим преимуществом систем и сетей

высокочастотной связи по линиям электропередачи является высокая надежность среды передачи, обеспечивающей работу при обрывах линий, при стихийных бедствиях [4]. Канал связи находится непосредственно в собственности энергетиков, что упрощает организацию и обслуживание канала связи, позволяет осуществлять непрерывный контроль состояния канала связи. Оборудование и аппаратура высокочастотной связи по линиям электропередачи включает в себя соединительные устройства, линейные заградители, устройства передачи отключающего сигнала — оборудование телезащиты, телефонные коммутаторы и модемы данных [5].

Характеристики радиопротокола XNB	Значение
Модуляция сигнала	DBPSK
Частота передачи Uplink	868.8 МГц
Частота передачи Downlink	446.0 МГц
Альтернативные рабочие частоты	До 1ГГц по запросу
Скорость передачи	50/100/1000 бит/с
Ширина полосы канала передающего устройства	100 Гц
Доступное количество каналов в ISM-полосе 868.8 МГц	5 000 каналов
Эффективность использования ISM-спектра 868.8 МГц	Высокая
Мощность передачи	25 мВт
Шифрование	AES-128, XTEA-256, ГОСТ Р34.12-2015
Защита от помех	FEC, CRC32, псевдослучайная перестройка частоты
Множественный доступ	Интеллектуальное распределение каналов
Удаленное обновление ПО устройств	Да
Двухсторонний канал связи	Да
Дальность передачи сигнала	До 10 км в городских условиях До 50 км в зоне прямой видимости
Потребление на отправку пакета данных	35-40 мА в течение 10 секунд

Рис. 1. Характеристики системы контроля и учета электроэнергии

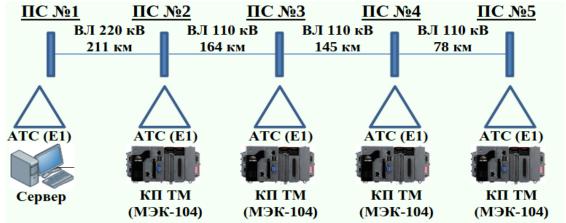


Рис. 2. Структурная схема системы высокочастотной связи по линиям электропередачи

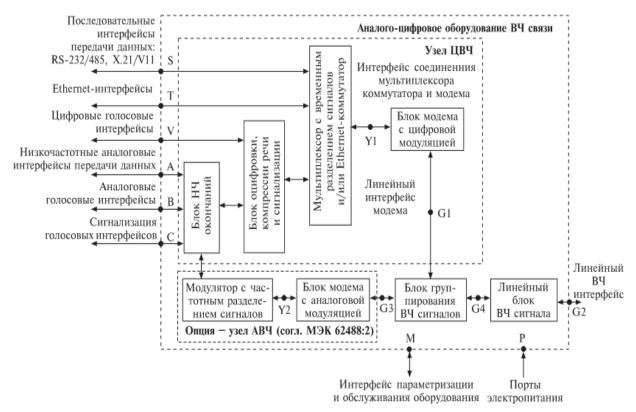


Рис. 3. Схема оборудования канала высокочастотной связи

Выявлены проблемы информационной безопасности систем и сетей связи по линиям электропередачи. Проблема обеспечения конфиденциальности — возможность нарушения конфиденциальности передаваемых данных через силовые линии электроснабжения посредством их перехвата. Проблема обеспечения целостности — возможность нарушения целостности передаваемых данных посредством их подмены. Проблема обеспечения доступности — возможность нарушения доступности передаваемых данных посредством зашумления канала связи или его физического уничтожения.

- 1. Горюнов А.Г., Ливенцов С.Н., Чурсин Ю.А. Телеконтроль и телеуправление // Томск: Изд-во Томского политехнического университета. 2010. 139 с.
- 2. Муштаев В.В. Опыт внедрения систем ВЧ-связи по ЛЭП для предприятий электроэнергетики // Автоматизация и IT в энергетике. 2013. №. 6. С. 4–6.
- 3. Скитальцев В.С. Высокочастотные каналы релейной защиты. приемопередатчик ПВЗ-90М // СПб.: Центр подготовки кадров энергетики. 2005. 128 с.
- 4. Микуцкий Г.В., Скитальцев В.С. «Высокочастотная связь по линиям электропередачи», Энергия 1977г. 440 с.
- 5. Меркулов А.Г., Шкарин Ю.П., др. «Цифровые каналы высокочастотной связи», Горячая Линия Телеком, 2019. 240 с.

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО. Том 1. Биотехнологии
Биотехнологии

УДК 664.959

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ГОТОВОГО К УПОТРЕБЛЕНИЮ ПРОДУКТА НА ОСНОВЕ РЫБНОГО БУЛЬОНА И РАСТИТЕЛЬНЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ

Антонова А.Д. ¹ (аспирант) Научный руководитель – д.т.н., доцент Науменко Н.В. ²

- 1 Университет ИТМО
- 2 -Южно-Уральский государственный университет

e-mail: nastya.antonova.99@mail.ru

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РНФ 23-26-00290.

В последнее время наблюдается рост интереса к созданию и выпуску комбинированных продуктов, которые обогащаются растительными компонентами для улучшения их питательных свойств, а также для сокращения времени приготовления и обеспечения сбалансированного питания. В связи с этим разработка технологии готового продукта, имеющего в качестве основной пищевой системы концентрированный рыбный бульон с последующем внесением в него сухого растительного ингредиента из пророщенного зерна, является перспективным направлением в современной пищевой промышленности.

Ключевые слова

Зерновые культуры, проращивание зерновых культур, остатки филетирования рыбы, комбинированные продукты, вторичное сырье.

В последние десятилетия одним из наиболее перспективных направлений в технологии производства продуктов питания стало объединение различных видов сырья для повышения пищевой и биологической ценности продукта. Это позволяет создавать качественные и разнообразные блюда. Проращивание зерна пшеницы является сложным технологическим процессом, который требует определенных условий для получения сырья с нужными свойствами. Этот процесс представляет собой систему отдельных технологических операций для получения качественного сырья, которое может использоваться в различных продуктах. Бульоны и супы играют важную роль в сбалансированном рационе человека, так как содержат основные питательные вещества. Рыбные бульоны отличаются быстрым приготовлением и высоким содержанием полноценных белков, коллагена, макро- и микроэлементов, а также витаминов [1, 2].

Анализ литературы, научной информации и экспериментальных материалов отечественных и зарубежных авторов по вопросу создания комбинированных продуктов показал, что разработка единого способа подбора и обработки компонентов состава нецелесообразен. Это сложный многофакторный процесс, включающий разработку отдельных способов воздействия на зерно и рыбный компонент, технологические режимы и параметры процесса [1, 2].

Объектами исследования стали:

— мягкая яровая пшеница (*Triticum aestivum L.*), 4 класса, выращенная в Ивановской области, Пучежском районе, селе Попереково, закупленная в Санкт-Петербурге. Для получения растительного сырьевого ингредиента было использовано разовое измельчение пророщенного зерна пшеницы до средних значений медианы гранулометрического состава (133 ± 15) мкм;

– концентрированный рыбный бульон, полученный из остатков филетирования атлантической трески (хребтовые кости с прирезями мяса и головы обезжабренные с незначительными прирезями мяса) (Агама, Мурманск).

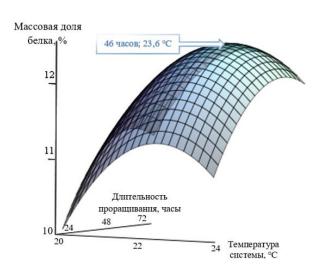
Выбор зерновой культуры в качестве растительного компонента был неслучаен, так как рекордный урожай 2022 года привел к избыточному обеспечению внутреннего спроса, что сделало необходимость снижения рисков потери продовольственного сырья и поиска новых эффективных технологий как никогда актуальной для перерабатывающей промышленности.

Трендом рыбной промышленности является глубокая переработка рыбы-сырца с целью максимального извлечения съедобных частей. Несмотря на рост производства рыбы, попрежнему существует проблема образования значительного количества вторичного сырья в процессе ее переработки, так как рынок направлен на получение удобных в быту полуфабрикатов (филе рыбы) и получение максимальной прибыли.

Учитывая вышесказанное, разработка ингредиента зернового сырья с использованием процесса проращивания и его размещение в пищевой системе рыбного бульона является актуальной.

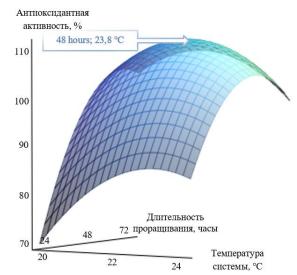
Проращивание зерна пшеницы — сложный технологический процесс, который необходимо рассматривать как целостную систему, состоящую из отдельных технологических операций, охватывающих все этапы получения качественного и безопасного сырьевого ингредиента. Для реализации поставленных задач по разработке зернового ингредиента с использованием процесса проращивания были детально изучены основные технологические этапы процесса [3, 4].

Анализ полученной информации и обработка экспериментальных данных двух факторным планированием позволил определить наиболее важные этапы процесса проращивания (рис. 1 и 2). В качестве переменных факторов использовались: температура системы (20, 22, 24 %) и длительность проращивания (24, 48, 72 часа). Контролируемыми показателями были определены: массовая доля белка и антиоксидантная активность, % (DPPH).



 $Y1 = -18,75 \cdot X_1^2 - 0,021 \cdot X_2^2 - 4,547 \cdot 10^{-13} \cdot X_1 \cdot X_2 + 466,95 \cdot 10^{-3} \cdot X_1 + 1,165 \cdot X_2 - 2,911$

Рис. 1. Поверхность отклика зависимости от температуры и длительности проращивания на массовую долю белка растительного сырьевого ингредиента



 $Y2 = -1,446 \cdot X_1^2 - 0,066 \cdot X_2^2 - 0,158 \cdot X_1 \cdot X_2 + 13,55 \cdot X_1 + 4,419 \cdot X_2 + 16,051$ Рис. 2. Поверхность отклика зависимости от температуры и длительности проращивания на общую антиоксидантную активность растительного сырьевого ингредиента

Результаты исследований массовой доли белка в зерне пшеницы после процесса контролируемого проращивания показывают, что наибольшая динамика увеличения характерна для следующих режимов технологического процесса: 46 часов при температуре 23,6°С, максимальное значение показателя массовой доли белка составит 12,1%. Представленные результаты исследований общей антиоксидантной активности зерна пшеницы после процесса

проращивания свидетельствуют о том, что наибольшая динамика увеличения характерна для следующих режимов технологического процесса: 48 часов при температуре 23,8°C, максимальное значение индекса общей антиоксидантной активности составит 102,3%. Полученные результаты находятся в прямой корреляции с содержанием флавоноидов и веществ полифенольной природы. Построенные поверхности имеют сходный характер.

На основании полученных экспериментальных данных в качестве контрольного образца был определен образец пророщенного зерна пшеницы, полученный при следующих условиях воздействия: температура проращивания -24.2 ± 0.6 °C, продолжительность процесса -46.7 ± 2.3 часа.

Добавление измельченного растительного сырьевого ингредиента в более разбавленную систему позволяет получить продукт с низкими показателями вязкости и употреблять его «на бегу» в качестве питьевого «перекуса». Использование концентрированного рыбного бульона (массовая доля сухих веществ (10,0%) с 20% растительного сырьевого ингредиента позволяет получить систему с самыми высокими значениями вязкости и продукт с достаточно концентрированной матрицей и насыщенным вкусом.

Разброс параметра «Вязкость, м Π а*с» от 2,63±0,32 до 1,1±0,22 м Π а*с позволит каждому потребителю индивидуально подобрать концентрацию бульона и количество вносимого сырьевого ингредиента для получения органолептических свойств готового супа из рыбных субпродуктов как продукта для активного долголетия, наиболее соответствующего потребительским предпочтениям.

- 1. Казённова Н.К., Шнейдер Д.В., Казённов И.В. Изменение химического состава зерновых продуктов при проращивании // Хлебопродукты. 2013. №. 10. С. 55–57.
- 2. Кращенко В.В., Панчишина Е.М., Ким Г.Н. Обоснование рациональных параметров варки рыбных бульонов высокого качества из пищевых отходов лососевых. // Сб. науч. тр. Камчат. НИИ рыб. хоз-ва и океанографии. − 2011. − №. 20. − С. 88–93.
- 3. Науменко Н.В., Потороко И.Ю., Малинин А.В., Цатуров А.В. Оптимизация условий процесса проращивания зерна пшеницы // Научный журнал КубГАУ. 2019. №. 151 (07). DOI: 10.21515/1990-4665-151-017.
- 4. Пастушкова Е.В., Заворохина Н.В., Вяткин А.В. Растительное сырье как источник функционально-пищевых ингредиентов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Пищевые и биотехнологии. − 2016. − Т. 4. − № 4. − С. 105−113.

УДК 579.678

ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ IN SITU ПРИ КУЛЬТИВИРОВАНИИ STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS

Володарский М.О.¹ (студент), **Филозоп В.С.**¹ (студент), **Осьмак О.О.**¹ (студент) **Научный руководитель** — **Ашихмина М.С.**¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: michael.volodarsky@yandex.ru

Выполнено при поддержке Российского научного фонда (соглашение № 23-16-00224).

В данной работе был предложен альтернативный *in situ* метод определения молочной кислоты, позволяющий оценивать накопление молочной кислоты без остановки эксперимента по культивированию молочнокислых бактерий. Для практической реализации данного метода был поставлен ряд микробиологических экспериментов по подбору питательной среды.

Ключевые слова

Молочная кислота, молочнокислые бактерии, микробиология, тест-система, ферментация.

При создании заквасок с «активными» бактериями необходимо определять их способность вырабатывать молочную кислоту, так как на бактерии неизбежно воздействует физико-химическое напряжение, поэтому важно определить способность кисломолочных бактерий производить достаточное количество молочной кислоты, отслеживать ее количество в среде на протяжении всего процесса производства [1]. Современные методы не позволяют определять концентрацию метаболита без остановки эксперимента, что значительно увеличивает время изготовления кисломолочных продуктов. Предлагаемым решением является применение периодических структур — колец Лизеганга для создания смарт системы по определению молочной кислоты *in situ*.

Существуют исследования, подтверждающие адгезию клеточных культур к гидроксиапатитным паттернам. Такое взаимодействие может использоваться в различных подходах, в том числе и для доставки лекарств [2]. Предполагается, что кисломолочные бактерии могут также взаимодействовать с периодическими структурами, а это позволяет создать тест-систему на их основе.

Целью работы является создание платформы, позволяющей оценивать накопление молочной кислоты *in situ*. Задачи разделены на четыре крупных составляющих, включающих в себя различные эксперименты: уменьшение количества составляющих питательной среды; исследование влияния источников углерода на выход биомассы; определение минеральной составляющей; исследование влияния индикаторов на бактерии, определения их концентрации для визуальной оценки результатов.

В качестве индикаторов были выбраны следующие: бромтимоловый синий, феноловый красный, бромкрезоловый пурпурный. Индикаторы были выбраны исходя из литературных источников, их применения в коммерческих питательных средах, однако целесообразность применения и концентрация индикаторов требовали проведения дополнительных исследований. Была проведена серия экспериментов, по результатам которых была определена подходящая концентрация индикаторов -0.02~г/л, так же исходя из экспериментальных данных, можно сказать, что добавление индикатора в культуральную среду не влияет на рост и последующее выживание бактерий. Последующее культивирование *Streptococcus thermophilus* с бромтимоловым синим и феноловым красным показало, что данные индикаторные вещества изменяют окраску среды еще до начала интенсивного выделения молочной кислоты бактериями.

Микроорганизмы характеризуются разной способностью использовать различные соединения углерода для конструктивного энергетического метаболизма. С целью определения влияния углеродосодержащих компонентов на рост и метаболизм бактерий, проводили посевы на питательные среды, содержащие в качестве единственного источника углерода моно-, ди-или полисахариды. Рост микроорганизмов на средах с углеводами сопровождается накоплением органических кислот. Их образование регистрируют по изменению рН среды. Таким образом, за счет изменения рН среды, как следствие по изменению цвета индикатора, добавленного в питательную среду, можно говорить о способности организма использовать углеродный источник. Для определения источника углерода в питательной среде был проведен тест на ферментацию сахаров, схематичное изображение представлено на рисунке 1.

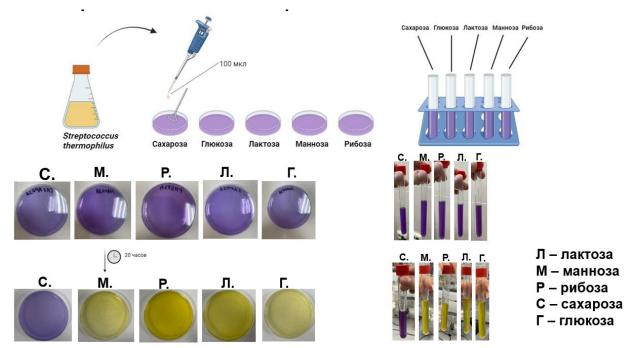


Рис. 1. Схема и результаты эксперименты по сбраживанию сахаров

В результате эксперимента выбранный штамм Streptococcus thermophilus сбраживает лактозу, маннозу, рибозу и глюкозу. Окисляет сахарозу. Поскольку для Streptococcus thermophilus характерно гомоферментативное брожение, а основным энергетическим субстратом для молочнокислых бактерий, осуществляющих гомоферментативное молочнокислое брожение являются моносахариды, в первую очередь глюкоза, то для энергетического субстрата было решено выбрать глюкозу [3].

При исследовании концентрации глюкоза и минеральной составляющей питательной среды использовалась матрица планирования, единицы варьирования, факторы, уровни варьирования представлены в таблице 1. Матрица планирования многофакторного эксперимента представлена в таблице 2.

Таблица 1 Единицы варьирования компонентов сред на различных уровнях

-Humide entre de la company de						
Компонент среды	Фактор	Уровень				
Концентрация глюкозы	X_1	-2	-1	0	1	2
Минеральная составляющая	X_2		-1		1	

Где фактор варьирования: глюкоза, минеральная составляющая. Уровни варьирования: -2; -1; 0; 1; 2 — для глюкозы (0.25/0.5/1/2/4~г/л). -1; 1 — для минеральной составляющей (NaCl 0.9%, фосфатно-солевой буфер (PBS)). При этом PBS содержит соли со следующими концентрациями: NaCl 8 г/л, KCl 0.2 г/л, Na₂HPO₄ 1.42 г/л, KH₂PO₄ 0.24 г/л.

Таблица 2

Harran arrana (an arra)	Уровни (факторов
Номер опыта (среды)	X1	X2
1	2	-1
2	1	-1
3	0	-1
4	-1	-1
5	-2	-1
6	2	1
7	1	1
8	0	1
9	-1	1
10	-2	1

Осмотическое давление играет большую роль в обеспечении жизнедеятельности микроорганизмов. Величина осмотического давления зависит от концентрации растворенных в питательной среде соединений. Поэтому важно подобрать наилучшую минеральную составляющую питательной среды. Для этого был поставлен представленный на рисунке 2 эксперимент.

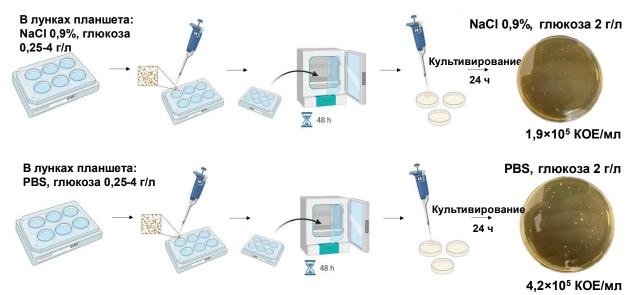


Рис. 2. Эксперимент по подбору минеральной составляющей в питательной среде

Результаты эксперимента фиксировали, подсчитывая колониеобразующие единицы (КОЕ) после культивирования. Наибольшее количество КОЕ было в чашке Петри, высеянной с питательной среды, содержащей PBS.

Концентрация глюкозы выше 5 г/л в питательной среде поднимет осмотическое давление системы, вследствие чего бактериальные клетки погибнут. Недостаточное содержание глюкозы не даст достаточно энергии бактериям для размножения и продуцирования молочной кислоты. Для определения наилучшей концентрации глюкозы был поставлен эксперимент в соответствии с матрицей планирования. Схематичное изображение поставленного эксперимента представлено на рисунке 3.

Исходя из количества КОЕ после процесса культивирования, по результатам эксперимента было выяснено, что концентрация глюкозы 4 г/л является наилучшей для данной системы. Прокультивированные бактерии на подобранной питательной среде, схема эксперимента и результата представлены на рисунке 4. Таким образом, была получена питательная среда со следующим составом: PBS (содержит NaCl 8 г/л, KCl 0,2 г/л, Na2HPO4 1,42 г/л, KH2PO4 0,24 г/л); глюкоза 4 г/л; бромкрезоловый пурпурный 0,02 г/л.

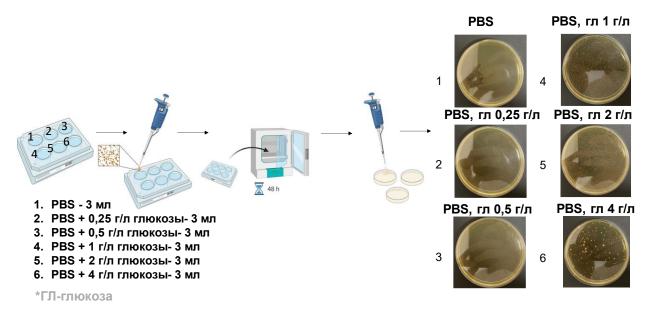


Рис. 3. Эксперимент по определению концентрации глюкозы в питательной среде

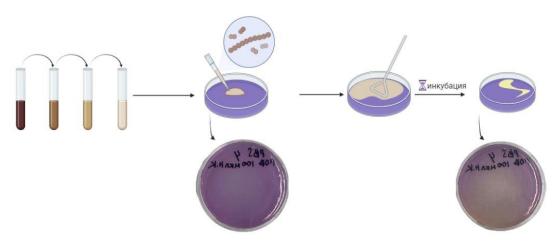


Рис. 4. Культивирование на подобранной среде

В ходе работы была получена питательная среда, обладающая достаточной питательностью для роста молочнокислых бактерий и составом, не влияющим на рост колец Лизеганга.

Список литературных источников

- Perry S.F. Freeze-drying and cryopreservation of bacteria // Mol. Biotechnol. 1998. Vol. 9. №. 1. Pp. 59–64.
- 2. Eltantawy M.M. et al. Self-Assembled Liesegang Rings of Hydroxyapatite for Cell Culturing // Adv. NanoBiomed Res. 2021. Vol. 1. №. 5. P. 2000048.
- 3. Pastink M.I. et al. Genome-Scale Model of Streptococcus thermophilus LMG18311 for Metabolic Comparison of Lactic Acid Bacteria // Appl. Environ. Microbiol. − 2009. − Vol. 75. − №. 11. − Pp. 3627–3633.

УДК 620.3

«ЗЕЛЕНЫЙ» СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА

Иванова Е.¹ (студент) **Научный руководитель** – к.т.н., доцент **Еремеева Н.Б.**¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: ivannkate451@gmail.com

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (РНФ) (проект № 23-26-00056).

В работе рассмотрен синтез наночастиц оксида цинка «зеленым» методом с использованием растительных экстрактов пижмы обыкновенной ($Tanacetum\ vulgare\ L$.), астрагала перепончатого ($Astragalus\ membranaceus$) и донника лекарственного ($Melilotus\ officinalis$). Показаны преимущества биосинтеза металлосодержащих наночастиц перед другими видами синтеза, предложена методика его проведения, а также рассмотрены перспективы применения наночастиц, получаемых «зеленым» синтезом.

Ключевые слова

Наночастицы, биосинтез, оксид цинка, пижма обыкновенная, астрагал перепончатый, донник лекарственный, растительные экстракты, разработка метода.

Биотехнология активно развивается, каждый год появляются все новые материалы, используемые для решения широкого спектра научных и промышленных задач. Отдельно стоит отметить возрастающий интерес к нанотехнологиям. Одним из наиболее перспективных и активно создаваемых видов наноматериалов являются наночастицы, имеющие разный состав и свойства. Благодаря своему размеру и высокой реакционной способности, такие наночастицы могут обладать разнообразными свойствами и по сравнению с традиционными материалами, более эффективно применяться в таких областях, как медицина, пищевая промышленность, химия, косметическая промышленность. Существует широкое разнообразие методов синтеза наночастиц, однако в большинстве случаев, частицы, полученные таким образом, являются токсичными для человека и окружающей среды, или же сама методика предусматривает использование ядовитых реагентов. Другим немаловажным препятствием для широкого применения данной группы материалов является дороговизна их производства: использование сложного дорогостоящего оборудования, требующего участия высококвалифицированных специалистов в процессе получения таких соединений, а также высокая стоимость исходного сырья, ограничивают распространение использования наночастиц в промышленности. Решением этих проблем может стать разработка «зеленого» синтеза наночастиц. Этот метод предусматривает применение в качестве исходного сырья растительных экстрактов, безопасных для экологии и человека, а также существенно уменьшает себестоимость готового продукта. В синтезе не используется сложное оборудование и токсичные реагенты. Таким образом, данный подход к производству наночастиц может стать отличной альтернативой уже ранее существующих методов.

Структурно наночастицы — это трехмерные частицы, которые по размеру находятся в диапазоне от 1 до 100 нм. Их поверхность представляет собой кристаллическую структуру самой разнообразной формы, зависящей от их состава [1].

Выделяют два основных подхода к синтезу наночастиц — «сверху-вниз» и «снизу-вверх». Эти группы способов получения имеют существенные различия: если в первом случае обычно говорят об измельчении более крупных объектов до наноразмера, то во втором происходит сборка более мелких объектов (например, молекул) в комплексы. К методам «сверху-вниз»

относят физические: механическое дробление, лазерная абляция, вытравливание и пр. Такое производство крайне дорогостоящее, за счет, в первую очередь использования сложного оборудования. Вторая группа методов подразделяется на химические и биологические. К химическим методам можно отнести золь-гель синтез, химическое осаждение из паровой фазы, сонохимический синтез и пр. Эти методы также предусматривают многостадийное получение с использованием сложного оборудование, а также опасных для экологии реактивов. К биологическим методам относятся биосинтез, фотосинтез и пр. Наночастицы, полученные таким путем, биоразлагаемы, относительно просты в производстве, не предусматривают использование сложной лабораторной техники.

Биосинтезированные наночастицы крайне вариабельны по своим свойствам. В их основе используются различные ионы металлов, таких как цинк, серебро, медь, железо, а также растительные экстракты. Огромное количество комбинаций позволяет задать такому материалу широкий спектр свойств, нужный для решения той или иной технической задачи.

Помимо растительных экстрактов существуют способы с использованием в биосинтезе наночастиц в качестве сырья различные виды водорослей, дрожжей, бактерий и даже клеток человека, однако растительное сырье обладает рядом преимуществ [1].

У растительных метаболитов, таких как флавоноиды, есть различные реакционные группы: карбонильные (-CO), гидроксильные (-OH) и аминные (-NH₂), которыми они способны связываться с ионами металлов и образовывать нанокомплексы. Эта группа соединений способна инициировать образование наночастиц за счет таутамерных переходов из енольной формы в кетоформу. При таком переходе высвобождается атом водорода, вступающий в реакцию с ионом металла и образующий комплекс. Другими активными растительными компонентами являются терпеноиды, имеющие сильное антиоксидантное действие. Также ионы металлов способны связываться непосредственно с белками растений. Аминокислоты связываются с ионами металлов через амино- и карбонильную группы основной цепи или через боковые. К примеру, лизин, цистеин, аргинин и метионин способны связывать ионы серебра, а гистидин образует связь с ионами золота [1].

Таким образом, за счет своей безопасности для человека и окружающей среды, низкой стоимости и высокой скорости роста исходного сырья, хорошей степени биосовместимости, а также наличию большого числа функциональных групп, растительные экстракты имеют огромный потенциал для синтеза наночастиц.

Металлическая часть наночастиц также достаточно вариабельна. Чаще всего применяются ионы серебра Ag, оксида цинка ZnO, золота Au. Эти металлы нетоксичны для человека, что открывает возможность их использования в медицине или пищевой промышленности. Благодаря металлической составляющей наночастицы приобретают мощный антибактериальный эффект, усиливаемый связью с растительным комплексом.

Стоит подробнее остановиться на критериях выбора растительной составляющей нанокомплекса. Как таковых ограничений в выборе растительного сырья нет, но стоит учитывать следующие факторы: процентное содержание ключевых веществ — флаваноидов в конкретном растении (также следует изучить, какие части растения накапливают их больше, соответственно, насколько целесообразно использовать все растение, или же следует ограничиться, к примеру, только зеленой частью или цветками), потенциальная опасность для человека и животных, доступность сырья в данном регионе, совместимость данного растительного экстракта с выбранным ионом металла.

При изучении литературы были выбраны три экстракта для проведения биосинтеза: пижма обыкновенная (*Tanacetum vulgare L.*), астрагал перепончатый (*Astragalus membranaceus*) и донник лекарственный (*Melilotus officinalis*). Каждое из этих растений достаточно хорошо изучено, их лекарственные свойства известны с давних времен и активно применяются в народной медицине. Также данные растения были выбраны исходя из их доступности в регионе: все они типичны для средней полосы России, такое сырье будет стоить дешево и при массовой закупке при масштабировании процесса «зеленого» синтеза наночастиц.

Различные виды пижмы широко применимы в производстве косметики, инсектицидов, используются при производстве бальзамов, красок, а также пищевых консервантов. В народной медицине чай на основе пижмы применяют как глистогонное, ветрогонное, спазмолитическое, пищеварительно-стимулирующее, противодиабетическое, мочегонное и антигипертензивное средство. Исследования пижмы обыкновенной показали, что ее наземные части содержат такие химические соединения, которые отвечают за антиоксидантные и лечебные свойства, как сесквитерпеновые лактоны, летучие масла, флавоноиды и фенольные кислоты [2].

Растения рода Астрагаловые, такие как Astragalus membranaceus, Astragalus globosus и Astragalus breviflorus также давно известны в народной медицине. Астрагал перепончатый (Astragalus membranaceus) – это небольшое многолетнее растение с развитой корневой системой, достигающей в длину 20-50 см. Его экстракты проявляют антиоксидантные, гипотензивные, противомикробные и противовирусные свойства, используются как диуретики, холеретики. Различные виды астрагала содержат сапонины, флавоноиды, фенилпропаноиды, полисахариды проявляют противовоспалительную, алкалоиды, стероиды И иммунорегуляторную, противоопухолевую, антиоксидантную, противодиабетическую, противовирусную и гепатопротекторную активность [3].

Донник лекарственный *Melilotus officinalis* произрастает в Европе и Азии, и известен как «донник желтый и донник лекарственный». *M. officinalis* обычно используется для лечения геморроя, бронхита, камней в почках, болезненных менструаций, боли в ушах, язв.

Исследования биологической активности продемонстрировали антиоксидантное, противовоспалительное и антипролиферативное действие M. officinalis. Предыдущие исследования биохимического профиля M. officinalis показали, что данное растение содержит кемпферол, кверцетин и производные кумарина [4].

Для синтеза наночастиц «зелены» был разработан следующий протокол:

- 1. Приготовление концентрированного раствора выбранного растительного экстракта.
- 2. Приготовление раствора соли заданной концентрации, содержащей ион металла, для комплексообразования.
- 3. Настаивание смеси полученных растворов.
- 4. Выделение наночастиц методом мембранной фильтрации из раствора.
- 5. Промывка, сушка целевого продукта.

Данная схема синтеза достаточно проста, однако следует учитывать влияние различных факторов на количественный выход наночастиц: температура, pH среды, концентрация ионов металла в растворе. Следует учитывать, что pH исходных растворов растительных экстрактов достаточно низкий (4,4–4,6), что может существенно оказать влияние на осаждение наночастиц в растворе.

Для дальнейшего изучения полученного продукта применяют следующие физические методы: ИК-Фурье спектроскопия, УФ- спектроскопия для уточнения расположения, длины и направленности связей в образовавшемся неорганическом комплексе, а также сканирующая электронная микроскопия для получения изображения готового продукта.

Предполагается, что наночастицы будут обладать выраженными антибактериальными свойствами, поскольку металлы, входящие в их состав, а также выбранные растительные экстракты проявляют такие свойства по отдельности друг от друга. Благодаря своему малому размеру, наночастицы способны ассоциироваться на поверхности бактериальной клеточной стенки, что вызовет ее повреждение. При таком повреждении у бактерии нарушается дыхание, возникает дисбаланс ионов, прерывается процесс трансдукции, что, в свою, очередь, приводит к лизису [5].

Малый размер, биобезопасность, наличие антибактериальных свойств и биоразлагаемость делают наночастицы крайне перспективным материалом. Возможно их включение в пищевые пленки для увеличения срока хранения пищевых продуктов. Благодаря малому размеру и большой реакционной площади каждой наночастицы, такие пленки будут высокоэффективны и могут заметно решить проблемы с неэкологичной упаковкой. Другим возможным применением нового материала может стать его использование в медицине для

доставки лекарств, так как такие наночастицы не нужно будет выводить из организма за счет их безопасности и разлагаемости без угрозы для здоровья человеку.

Синтез металлических наночастиц с использованием экстрактов растений обладает высоким потенциалом и имеет ряд преимуществ перед химическими и физическими методами. Однако, несмотря на то, что «зеленый» синтез экономически более выгоден по сравнению с традиционными методами, необходимо решить вопрос с его масштабированием. Очевидно, что при переносе из лабораторий в промышленные объемы, необходимо будет рассмотреть ряд технических задач для постановки непрерывного производства. Тем не менее, уже сейчас можно сказать, что за счет отсутствия в методике дорогостоящих компонентов или сложного технического оснащения, при массовом производстве рыночная цена на готовый продукт имеет все шансы быть ниже традиционно получаемых наночастиц. «Зеленый» синтез открывает новые возможности для исследователей, а также может в будущем изменить подход к созданию наноматериалов.

- 1. Макаров В.В., Лав А., Синицына О.В., Макарова С.С., Яминский И.В., Тальянский М.Э., Калинина Н.О. «Зеленые» нанотехнологии: синтез металлических наночастиц с использованием растений // Acta Naturae. 2014. Т. 6. №. 1. С. 35—44.
- 2. Babich O., Larina V., Krol O., Ulrikh E., Sukhikh S., Gureev M.A., Prosekov A., Ivanova S. In Vitro Study of Biological Activity of Tanacetum vulgare Extracts. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.mdpi.com/1999-4923/15/2/616 (дата обращения: 01.03.2024).
- 3. Kalayci B., Özek N., Aysin F., Özbek H., Kazaz C., Önal M., Güvenalp Z. Evaluation of cytotoxic and apoptotic effects of the extracts and phenolic compounds of Astragalus globosus Vahl and Astragalus breviflorus DC. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1319016423001755 (дата обращения: 01.03.2024).
- 4. Mert I., Zulfiqar A., Ikhlas A., Hakki T., Esra K. The regression of endometriosis with glycosylated flavonoids isolated from Melilotus officinalis (L.) Pall. in an endometriosis rat model. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1028455920300085 (дата обращения: 01.03.2024).
- 5. Rosli N.A., Teow Y.H., Mahmoudi E. Current approaches for the exploration of antimicrobial activities of nanoparticles. [Электронный ресурс] Режим доступа: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC8525934/ (дата обращения: 01.03.2024).

УДК 582.232: 579.243

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА РОСТ БИОМАССЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ *CYANOBACTERIA RIPPKA B-1200*

Матыцина В.В.¹ (аспирант), **Рухляда К.А.**¹ (аспирант) **Научный руководитель** – **д.т.н., профессор Кригер О.В.**¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: vikaamtcn@mail.ru

Работа выполнена в рамках темы HИОКТР №623096 «Научно-практические аспекты переработки возобновляемых источников сырья для получения биотоплива и продуктов с высокой добавленной стоимостью».

В работе рассмотрено влияние таких факторов как температурный режим и спектральный состав света на прирост биомассы цианобактерий *Cyanobacteria Rippka B-1200*. Изучены фазы роста этого штамма цианобактерии. Были выявлены оптимальные условия культивирования с целью максимизации выхода биомассы цианобактерий для дальнейшего извлечения из биомассы биологически активных веществ.

Ключевые слова

Сине-зеленые водоросли, биомасса, цианобактерии, культивирование, фазы роста.

Цианобактерии представляют собой одну из крупнейших групп прокариот. Обладая разнообразием морфологии, физиологии, паттернов клеточного деления, клеточной дифференциации и сред обитания, цианобактерии объединены способностью кислородного фотосинтеза, аналогичного растительному, используя воду в качестве донора электронов и обладая хлорофиллом а и фикобилипротеинами в качестве фотосинтетических пигментов.

Цианобактерии выявлены как богатый источник биологически активных соединений. Изолированные соединения включают поликетиды, амины, алкалоиды, жирные кислоты, индолы и липопептиды. Диапазон биологической активности вторичных метаболитов, выделенных из цианобактерий, включает антибактериальное, противогрибковое, противоводорослевое, антипротозойное, противоопухолевое и противовирусное действие [1].

В условиях избытка необходимых питательных веществ многие цианобактерии обычно усваивают и запасают питательные вещества для последующего использования. В них выделены различные материалы для хранения, такие как гликоген, сера, полиаминокислоты, полифосфаты, полигидроксиалканоаты (РНА) и липиды. РНА представляют собой липидный материал, накопленный широким спектром микроорганизмов в присутствии обильных источников углерода. Эффективное производство РНА с использованием цианобактерий является технологически сложной задачей. Тем не менее, он остается привлекательным подходом, учитывая тот факт, что источником углерода является непосредственно атмосферный СО2. Напротив, более эффективное производство РНА бактериями основано на использовании ценных источников углерода, таких как сахара из крахмала и жирные кислоты из растительных масел. В связи с растущим давлением на сокращение выбросов СО2 возрастает спрос на растительные продукты, такие как крахмал и растительные масла, для использования в качестве исходных материалов для производства биотоплива и биологически основанных материалов. Поэтому ожидается увеличение спроса на растительную продукцию, что потребует использования более плодородных земель для сельскохозяйственной деятельности. В таком сценарии использование цианобактерий для производства РНА может

стать более перспективным, поскольку крупномасштабное выращивание цианобактерий не требует плодородных земель.

Цианобактерии являются мощными источниками биологически активных соединений, биоудобрений, биопластика, энергии, продуктов питания и в настоящее время используются в разработке лекарств, медицинской диагностики и биоремедиации [2].

Пока биотехнологический потенциал цианобактерий привлекает все большее внимание, большинство коммерческих соединений были выделены из пресноводных цианобактерий. Морская среда с различными условиями окружающей среды, начиная от мелководной эвфотической зоны и заканчивая глубоководными гидротермальными источниками, вероятно, является хорошим источником для различных видов цианобактерий, которые могут иметь большое биотехнологическое значение.

В настоящее время цианобактерии нашли применение для решения фундаментальных биовопросов и прикладных биотехнологических целей, поэтому актуальной задачей является подбор и оптимизация параметров культивирования цианобактерий с целью наращивания биомассы для дальнейшего извлечения из нее биологически активных веществ [3].

Для проведения опыта был выбран штамм цианобактерии *Cyanobacteria Rippka B-1200* (рисунок) из Коллекции IPPAS ИФР РАН микроводорослей и цианобактерий. Он был предоставлен Государственным научно-исследовательским институтом генетики (ГНИИГ), г. Москва. Штамм охарактеризован как алкалофил, мезофил, светолюбивый и автотроф, выделен в 2023 году из Балтийского моря, Россия.

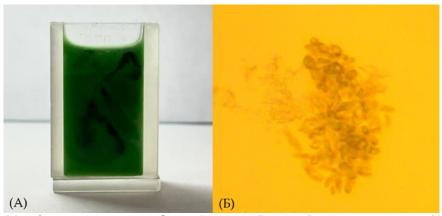


Рисунок. Морфология штамма *Cyanobacteria Rippka B-1200*: макровид (A), клетки при 40-кратном увеличении (Б)

В коническую колбу объемом 500 мл помещалось 200 мл питательной среды Заррука и 2 мл суспензии со штаммом *Cyanobacteria Rippka B-1200*.

Методом периодического культивирования штамм *Cyanobacteria Rippka B-1200* выращивали в питательной среде Заррука в конических колбах объемом 500 мл при разных освещениях и температурах параллельно в двух поверхностях.

Для этого был поставлен двухфакторный эксперимент (табл. 1), где за факторы брались:

- 1. Температура (x_1) : образцы культивировались при комнатной температуре 23 градуса (-1) и в термостате при 28 градусах (+1).
- 2. Освещение (x_2) : образцы культивировались при постоянном белом свете 1440 люкс (-1) и при постоянном фиолетовом свете 220 люкс с длиной волны 380–780 нм (+1).

Раз в семь дней в колбы с культивируемым штаммом добавлялось по 1 мл комплексного удобрения для аквариумных растений.

Каждые два дня из колб отбирались пробы и определялся прирост биомассы путем измерения оптической плотности образцов на спектрофотометре при длине волны 600 нм в кварцевых кюветах с длинной оптического пути 5,070 мм. Начальная оптическая плотность всех образцов составляла 0,02 оптических единиц. Общая продолжительность культивирования составила 81 сутки.

Таблица 1

Схема двухфакторного эксперимента

№ эксперимента	\mathbf{x}_1	\mathbf{x}_2
1	-1	-1
2	-1	+1
3	+1	-1
4	+1	+1

Штамм продуцировал максимальное количество биомассы при освещенности белым светом 1440 люкс и при температуре 23 градуса, значение спектрофотометра равнялось 3,996 оптических единиц (табл. 2).

Рост биомассы штамма *Cyanobacteria Rippka B-1200* при освещенности фиолетовым светом 220 лк с длиной волны 380–780 нм и при температуре 23 градуса был меньше в 1,29 раз по сравнению с первым образцом, 3,0979 оптических единиц.

Образец с условиями культивирования 28 градусов и с освещенностью белым светом 1440 люкс показал рост биомассы меньше в 4 раза, чем первый образец, 0,999 оптических единиц.

Штамм продуцировал минимальное количество биомассы при освещенности фиолетовым светом 220 лк с длиной волны 380–780 нм и при температуре 28 градусов, прирост биомассы меньше в 4,8 раз по сравнению с первым образцом, 0,832 оптических единиц.

Таблица 2 Прирост биомассы *Cyanobacteria Rippka B-1200* при разных условиях культивирования

Образец	Начальная оптическая плотность, ОЕ	Конечная оптическая плотность, ОЕ	Прирост биомассы, ОЕ
1	0,02	3,996	3,976
2	0,02	3,0979	3,0779
3	0,02	0,999	0,979
4	0,02	0,832	0,812

Были подобраны оптимальные условия культивирования штамма цианобактерии *Cyanobacteria Rippka B-1200* для максимизации выхода биомассы — это белый нейтральный свет с степенью освещенности 1140 люкс и комнатная температура 23 градуса, вероятно, это связано с естественными условиями обитания этого штамма цианобактерий: в период их цветения в июле температура Балтийского моря составляет +19...+23 градуса.

Изменение температуры культивирования этого штамма цианобактерий влияет на рост больше, чем изменение освещенности в 3,1 раз. По сравнению с первым образцом увеличение температуры снизило прирост в четыре раза, а изменение спектра света на фиолетовый в 1,29 раз.

Цианобактерии могут быть использованы в различных областях, таких как пищевая, фармацевтическая, косметическая и энергетическая промышленности.

Также, изучение оптимальных условий культивирования цианобактерий позволяет лучше понять их биологию и физиологию, что в свою очередь может привести к разработке новых методов борьбы с загрязнением окружающей среды и созданию новых продуктов с высокой добавленной стоимостью.

- 1. Ruiz J. et al. Towards industrial products from microalgae // Energy & Environmental Science. 2016. T. 9. №. 10. Pp. 3036–3043.
- 2. Sarsekeyeva F. et al. Cyanofuels: biofuels from cyanobacteria. Reality and perspectives // Photosynthesis research. 2015. T. 125. Pp. 329–340.
- 3. Castenholz R.W. General characteristics of the cyanobacteria // Bergey's Manual of Systematics of Archaea and Bacteria. 2015. Pp. 1–23.

УДК 664

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ ЭКСТРАКТОВ ЧЕСНОКА И ЛУКА

Николаева Е.С.¹ Научный руководитель – к.т.н., доцент Еремеева Н.Б.¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: elena.stolbowa-elena2016@yandex.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 623095 «Создание биополимерных наночастиц для инкапсуляции активных компонентов лекарственных растений».

Экстракты чеснока и лука содержат биологически активные вещества с иммуномодулирующими свойствами, однако из-за высокой летучести и чувствительности к внешним факторам их применение ограничено. В статье предложен метод инкапсуляции экстрактов, обеспечивающий защиту молекул от разложения, повышает их биодоступность и стабильность. Приведены результаты исследования морфологии инкапсулированных частиц.

Ключевые слова

Инкапсуляция, чеснок, лук, получение инкапсулятов, морфология частиц.

В соответствии с Указом Президента РФ от 21.01.2020 N 20, формирование принципов здорового образа жизни и рациона здорового питания для всех групп населения является приоритетной задачей. Одним из путей решения данной задачи является развитие производства продуктов питания, обогащенных функциональными ингредиентами с иммуномодулирующим действием. Особое внимание уделяется продуктам растительного происхождения, которые являются источниками естественных нутриентов, таких как витамины, минералы, ферменты, органические кислоты, эфирные масла, пищевые волокна и полисахариды [1].

Чеснок и лук, хотя и не включены в перечень лекарственных растений Государственной фармакопеи РФ, активно используются в народной медицине и служат сырьём для производства различных препаратов. Экстракты этих растений содержат активные соединения, оказывающие иммуномодулирующее действие на организм и обладающие широким спектром антибактериальной активности против грамотрицательных и грамположительных бактерий.

Тиосульфат аллицин, содержащийся в экстрактах чеснока и лука, известен своей вирулицидной активностью в отношении различных вирусов. Полифенольный флавоноид кверцетин и его производные обладают противовирусной активностью против риновируса, вируса гриппа, эболы, зика, гепатитов В и С. Апигенин и его производные выступают в качестве метаболитов против SARS-CoV-2 и потенциально могут улучшать такие симптомы, как насыщение кислородом. Флавоноид физетин используется для лечения хронических и респираторных заболеваний, диабета и ожирения. Исследования полифенола катехина показали его ингибирующую активность в отношении SARS-CoV-2 [2, 3].

Использование экстрактов чеснока и лука ограничено из-за высокой летучести отдельных компонентов, их низкой растворимости в водной фазе, взаимодействия с питательными компонентами пищевой матрицы, чувствительности к свету и кислороду, а также неприятных запаха и вкуса. Для решения этой проблемы предложен метод наноинкапсулирования, заключающийся в заключении экстрактов в полимерную оболочку. Распространенными подходами являются инкапсулирование в наночастицы, упаковочные пленки, наноэмульсии и липосомы.

Инкапсулирование повышает стабильность и биоактивность компонентов в реальных пищевых системах, обеспечивает контроль высвобождения и доставки активных веществ, а также сводит к минимуму неприемлемые органолептические эффекты [4, 5].

Цель работы: исследовать и описать технологию получения инкапсулированных экстрактов чеснока и лука, а также исследовать морфологию и распределение частиц по размерам инкапсулированных экстрактов.

Для исследования морфологии и распределения частиц по размерам инкапсулированных экстрактов использовали эмиссионный сканирующий электронный микроскоп (СЭМ) [6]. СЭМ позволяет одновременно исследовать размеры и форму частиц, их распределение по размерам и по площади исследуемого образца, а также получить изображение объекта в широком диапазоне увеличений во вторичных и отраженных электронах. Объектом исследования в СЭМ являются образцы инкапсулированных экстрактов чеснока и лука с мальтодекстрином.

Для приготовление инкапсулированных препаратов использовали образцы чеснока и лука, приобретенных в местном супермаркете, спирт этиловый 96%, мальтодекстрин.

Измельченное сырье помещали в 96%-ый раствор спирта и экстрагировали в течение 24 часа. Полученные экстракты фильтровали и подвергали дистилляции на ротационном испарителе при температуре 60°С и давлении 200 мбар до полного испарения спирта. Чистые экстракты смешивали с 0,5%-ым раствором мальтодекстрина в пропорции 2:1 (раствор 0,5% мальтодекстрина: чистый экстракт) и замораживали при температуре -80°С в течение суток. После замораживания образцы подвергались сублимационной сушке.

В ходе исследования получены инкапсулированные препараты экстрактов чеснока и лука (рис. 1). Они отличаются по цвету, имеют приятный запах по сравнению с чистыми экстрактами.



Рис. 1. Инкапсулированные экстракты чеснока (слева) и лука (справа)

На рисунках 2–3 представлены результаты исследования частиц высушенных экстрактов чеснока и лука при 1000-кратном увеличении на сканирующем электронном микроскопе.

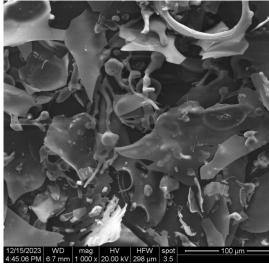


Рис. 2. Частицы инкапсулированного экстракта чеснока (×1000)

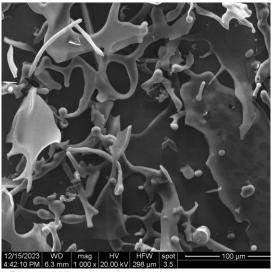


Рис. 3. Частицы инкапсулированного экстракта лука (×1000)

На рисунке 4 отображены результаты исследования морфологии частиц при более сильном увеличении. Следует отметить, что препарат инкапсулированного экстракта чеснока имеет более мелкие частицы, чем у препарата инкапсулированного экстракта лука.

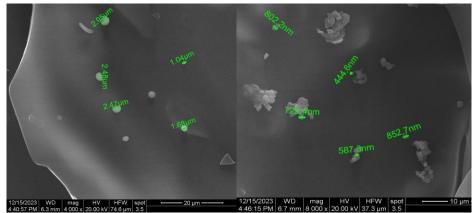


Рис. 4. Частицы инкапсулированных экстрактов лука (×4000) – слева, чеснока (×8000) – справа

В результате проведенного исследования можно сделать вывод, что метод инкапсулирования экстрактов чеснока и лука позволяет получить препараты с улучшенными органолептическими свойствами по сравнению с чистыми экстрактами.

Полученные инкапсулированные экстракты чеснока и лука перспективны для дальнейшего изучения их антиоксидантной активности, содержания фенольных соединений и флавоноидов с целью создания функциональных ингредиентов для обогащения пищевых продуктов.

Использование инкапсулированных экстрактов чеснока и лука в производстве функциональных продуктов питания может способствовать реализации приоритетной задачи формирования принципов здорового образа жизни и рациона здорового питания для всех групп населения.

- 1. Указ Президента РФ от 21.01.2020 N 20 "Об утверждении Доктрины продовольственной безопасности Российской Федерации"/Собрание законодательства Российской Федерации. 2020 г. №20. Президент Российской Федерации: официальный сайт. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.kremlin.ru/acts/bank/45106 (дата обращения: 01.12.2023).
- 2. Olusanmi M.J., Amadi J.E. Studies on the antimicrobial properties and phytochemical screening of garlic (Allium sativum) extracts // Ethnobotanical Leaflets. − 2010. − №. 4. − Pp. 537–545
- 3. Akter R., Md. Rashidur R., Zainab. A., Afrose A. Plausibility of natural immunomodulators in the treatment of COVID-19–A comprehensive analysis and future recommendations// Heliyon. −2023. №. 6. P. 17478.
- 4. Essential Oil Encapsulations: Uses, Procedures, and Trends / Hamid M. [и др.] // RSC Advances. 2015. №5. Pp. 58449–58463.
- 5. Бычкова Е.С., Син А.Д., Белякова Д.А., Котова Я.С., Ломовский И.О Тенденции развития технологии микрокапсулирования // Пищевая промышленность. 2021. №. 4. С. 36—41.
- 6. Зеер Г.М., Фоменко О.Ю., Ледяева О.Н. Применение сканирующей электронной микроскопии в решении актуальных проблем материаловедения // Журнал СФУ. Химия. 2009. № 4. С. 287–293.

УДК 579.62

ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЭКСТРАКЦИИ ПИГМЕНТОВ ИЗ БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ FUCUS VESICULOSUS

Рухляда К.А. 1 (аспирант), Матыцина В.В. 1 (аспирант) Научный руководитель — д.т.н., профессор Кригер О.В. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: ksn.ruh@gmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИРМА №623096 «Научно-практические аспекты переработки возобновляемых источников сырья для получения биотоплива и продуктов с высокой добавленной стоимостью».

В работе рассмотрено влияние таких факторов как температуры, длительность экстракции, концентрация растворителя и гидромодуль на степень экстракции пигментов из морских водорослей. Были определены оптимальные условия экстракции с целью максимизации выхода пигментных комплексов для их дальнейшего использования в получении биологически активных добавок.

Ключевые слова

Бурые водоросли, морские водоросли, *fucus vesiculosus*, пигменты, биологически активные вещества, фукус пузырчатый.

Пигменты — это химические вещества в растениях, которые обусловливают их цвет, например, зеленые листья, красные помидоры. Но функции пигментов этим не ограничиваются. Воздействие некоторых растительных пигментов на организм человека подобно воздействию витаминов и микроэлементов. Известно, что они оказывают многогранное благотворное воздействие на организм человека, укрепляя сосудистую систему и улучшая состав крови за счет участия в синтезе галактуроновой кислоты. Пигменты обладают противовирусными, бактерицидными и противовоспалительными свойствами. Даже те пигменты, которые не обладают фармакологическим действием, активно используются в пищевой промышленности — это эффективные и, самое главное, натуральные, безопасные красители [1]. Таким образом, подбор оптимальных коэффициентов экстракции пигментов для получения биологически активных веществ является важной областью пищевой биотехнологии. В нашем исследовании мы рассмотрели наиболее распространенные вещества группы пигментов: хлорофиллы и каротиноиды.

Хлорофилл является одним из наиболее часто используемых красителей, получаемых из зеленых листьев и других частей зеленых растений. Он содержит много важных витаминов и минералов, широко используется для производства биологически активных добавок. Хлорофилл используется в пищевой промышленности в качестве натурального красителя Е140.

Каротиноиды являются источником провитамина A, они способствуют здоровому цвету кожи, помогают поддерживать нормальное зрение, и есть достоверные доказательства улучшения когнитивных функций после приема определенных каротиноидов. Каротиноиды также обладают антиоксидантными свойствами и могут оказывать противоопухолевое действие на организм человека. В пищевой промышленности — пищевая добавка E160, придающая продуктам оранжевый цвет.

В качестве сырья использовались водоросли *Fucus vesiculosus*, собранные в Балтийском море (рис. 1). Морские водоросли — уникальное сырье, способное за короткое время формировать большую биомассу, синтезировать химические соединения, выполняющие определенные физиологические функции, и различные биологически активные вещества [2].

Бурые водоросли имеют промышленное значение, многие из которых обитают в наших северных морях. Большие запасы бурых водорослей в Северном рыбохозяйственном бассейне и наличие в их составе широкого спектра пигментов определяют их использование в качестве сырья для производства пигментных комплексов. *Fucus vesiculosus* (фукус пузырчатый), широко распространенный вид бурых водорослей, растущих в холодных и умеренно холодных водах вдоль скалистых берегов в Северном полушарии [3]. Перед экстракцией водоросли были высушены и измельчены.



Рис. 1. Fucus vesiculosus

Традиционный метод экстракции биологически активных соединений заключается в экстракции водой, которая является хорошим растворителем. Однако в этом случае необходимо применять высокие температуры, которые могут разрушить структуру пигментов. Наиболее известным способом переработки водорослей является экстракция этанолом, в ходе которой извлекается основная часть минеральных и органических веществ, проявляющих биологическую активность [4]. Низкая токсичность этанола также определяет его использование в пищевой промышленности. Экстракцию пигментов проводили при изменении температуры, продолжительности экстракции, концентрации спирта и соотношения масс сырья и экстрагента.

Для измерения хлорофилла чаще всего используются спектрофотометрические методы, поскольку они обеспечивают быструю, точную и недорогую оценку концентрации хлорофилла. Для определения пигментов использовались спектрофотометрические измерения при длинах волн 649 и 665 нанометров для хлорофилла и 470 нанометров для каротиноидов —области максимума поглощения для данных пигментов. Количественное содержание хлорофиллов рассчитывали по формуле (1) [5].

$$C_{ch(a)} + C_{ch(b)} = 6.1 * D_{665} + 20.04 * D_{649},$$
 (1)

где $C_{ch(a)}$ — содержание хлорофилла а (мг/л), $C_{ch(b)}$ — содержание хлорофилла b (мг/л), D_{665} , D_{649} — оптическая плотность в области максимума поглощения хлорофиллов.

Количественное содержание суммы каротиноидов рассчитывали по формуле (2) [5].

$$C_c = \frac{1000*D_{470}-2,13*C_{ch(a)}-97,63*C_{ch(b)}}{209},$$
 (2)

где C_c – количественное содержание каротиноидов (мг/л), D_{470} – оптическая плотность в области максимума поглощения каротиноидов.

Температура экстракции варьировалась от 4°C до 50°C, при повышении температуры выше 50°C возможно разрушение пигментов. Экстракцию проводили в течение 30, 60, 90 и 120 минут. Наибольшее количество хлорофилла наблюдалось при экстракции при температуре 50°C и времени экстракции 30 минут. Для максимального извлечения зеленых пигментов из сырья использовались различные концентрации этанола: 40, 70 и 96%. Было определено, что 96% спирт демонстрирует высокую степень восстановления количества хлорофиллов. Максимальное количество хлорофилла было определено при соотношениях массы водорослей и этанола 1 к 5 (рис. 2).

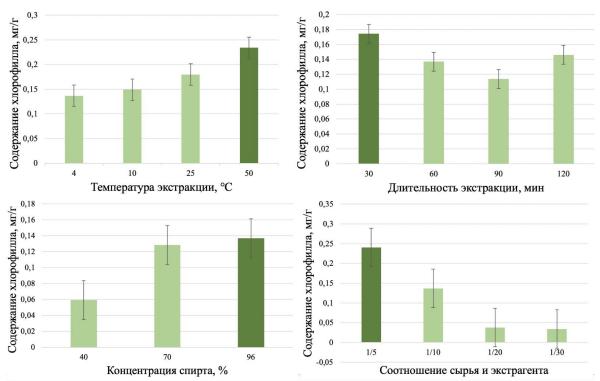


Рис. 2. Зависимость количества экстрагированных пигментов (хлорофиллов) от параметров экстракции

Затем, объединив выбранные параметры в одном эксперименте, было выделено 0,24 мг хлорофилла на г навески. Это в два раза больше, чем при классических параметрах.

Во время экстракции каротиноидов параметры менялись в том же порядке. Для лучшего извлечения каротиноидов параметры экстракции оказались равными -50° С и 90 минут. Как и при экстракции хлорофиллом, наибольший выход каротиноидов наблюдался при соотношении количества исследуемого материала к этанолу 1 к 5. Однако для наилучшего извлечения концентрация спирта понадобилась меньшая -70% (рис. 3).

При сочетании всех наилучших параметров экстракции каротиноидов наблюдалось значительное увеличение количества выделенных пигментов по сравнению со всеми экспериментами $-0.04~\rm Mr/r.$

Таким образом, определены оптимальные условия для спиртовой экстракции пигментов. Использование этилового спирта в качестве экстрагента для производства натуральных красителей может быть очень перспективным.

В дальнейшей работе планируется продолжить изучение биохимического состава бурых водорослей Балтийского моря, получить пигменты в порошкообразной и жидкой форме, а также изучить извлечение полифенолов и полисахаридов из водорослей.

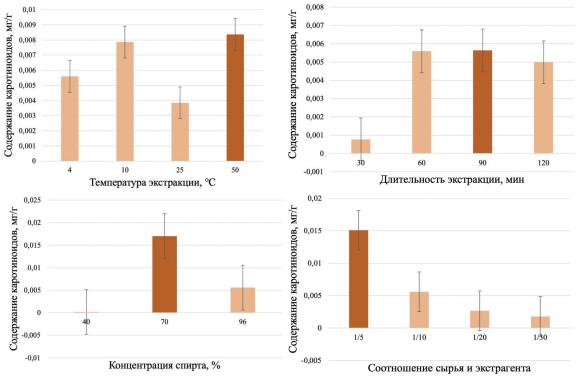


Рис. 3. Зависимость количества экстрагированных пигментов (каротиноидов) от параметров экстракции

- 1. Ye K. et al. A Review of Pigments Derived from Marine Natural Products // Isr J Chem. 2019. Vol. 59. №. 5. Pp. 327–338.
- 2. Milledge J. et al. Macroalgae-Derived Biofuel: A Review of Methods of Energy Extraction from Seaweed Biomass // Energies (Basel). − 2014. − Vol. 7. − №. 11. − Pp. 7194–7222.
- 3. Ayrapetyan O.N. et al. Antibacterial Properties of Fucoidans from the Brown Algae Fucus vesiculosus L. of the Barents Sea // Biology (Basel). − 2021. − Vol. 10. − №. 1. − P. 67.
- 4. Kumar B.R. et al. A state of the art review on the cultivation of algae for energy and other valuable products: Application, challenges, and opportunities // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021. Vol. 138. P. 110649.
- 5. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents // Biochem Soc Trans. − 1983. − Vol. 11. − №. 5. − Pp. 591–592.

УДК 579.0

МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ МИКРООРГАНИЗМОВ

Санников М.В. 1 (студент), Смирнов И.С. 1 (студент) Научный руководитель — Лаврентьев Ф.В. 1

1 – Университет ИТМО

e-mail: mvsannikov@itmo.ru, is smirnov@itmo.ru

Работа выполнена в рамках темы НИР № 423026 «Разработка линейки лиофилизированных заквасок со спорообразующей пробиотической культурой Bacillus coagulans для производства кисломолочных продуктов».

В данной статье рассматривается актуальная проблема идентификации и классификации микроорганизмов. Авторы представляют различные методы, используемые для определения видов микроорганизмов, включая молекулярные методы, биохимические тесты, микроскопию и культивирование на различных средах. Также описывается значение точной классификации микроорганизмов для прогнозирования патогенности и выбора методов борьбы с ними. В статье приводятся примеры успешного применения различных методов идентификации и классификации микроорганизмов в различных областях, включая медицину, сельское хозяйство и промышленность.

Ключевые слова

Микроорганизмы, идентификация, классификация, бактерии, молекулярные методы, биохимические тесты, микроскопия, культивирование, патогенность, медицина, сельское хозяйство, промышленность.

Микроорганизмы играют огромную роль в жизни человека, ведь их влияние на сферу биотехнологий, пищевой промышленности, медицины, генной инженерии усиливается от года к году. Их важность обуславливается наличием уникальных свойств, благодаря которым современным учёным удаётся синтезировать антибиотики, различные терапевтические препараты. Микроорганизмы используются при производстве кисломолочных продуктов, ферментированных овощей и мяса, заквасок для хлеба, их добавляют в качестве пробиотиков и источника ферментов, оказывающих положительное влияние на микрофлору желудочнокишечного тракта. Микроорганизмы позволяют разрабатывать функциональное питание, пригодное к употреблению людьми, имеющими определённые пищевые ограничения. В то же время важно понимать, что не все микроорганизмы безопасны для человека и процессов его жизнедеятельности. Так, в частности, по данным федеральной службы государственной статистики за период с 2000 по 2022 годы в России доля бактериальных и иных неинфекционных заболеваний составляла в диапазоне от максимального значения в 2000 году -6,06 % от общего числа случаев заболеваний в стране за год (6448 тысяч зарегистрированных *случаев*) до минимального (на момент написания статьи) уровня в $2022 \, \text{году} - 2,55 \, \%$ от общего числа случаев заболеваний в стране за год (3324,4 тысячи зарегистрированных случаев), что демонстрирует развитие микробиологии и биотехнологии в сфере борьбы с возбудителями бактериальных инфекций и значительное уменьшение случаев заболевания граждан, однако бактериальные заболевания всё ещё достаточно распространены в нашей стране и их своевременная, оперативная диагностика и лечение требует подбора оптимальных методов идентификации и классификации микроорганизмов, что позволит разрабатывать так же и новые или совершенствовать существующие методы борьбы с бактериальными заболеваниями. Именно поэтому в современных реалиях остро стоит проблема качественного и достоверного распознавания микроорганизмов, а также их точной классификации [1].

В настоящее время существует множество методов идентификации микроорганизмов, которые можно разделить на 3 большие группы, такие как микроскопия, молекулярные методы и метод культуральной оценки. Кроме того, в последнее время становится популярным комбинирование методов машинного обучения и классических методов идентификации и классификации микроорганизмов, что значительно повышает качество получаемых результатов и уменьшает сложность проводимых исследований.

Начнём с методов оптической и электронной микроскопии, ведь именно они практически всегда являются первым этапом изучения микроорганизмов.

Суть **метода оптической микроскопии** заключается в использовании видимого света для создания изображений микроорганизмов. На данный момент самыми популярными модификациями этого метода являются фазово-контрастная микроскопия, дифференциальная интерференционная контрастная микроскопия и флуоресцентная микроскопия.

Фазово-контрастная микроскопия является незаменимым методом исследования микроорганизмов. Это метод, который позволяет визуализировать прозрачные объекты, такие как живые клетки и микроорганизмы, с высоким контрастом. Принцип работы фазовоконтрастной микроскопии основан на изменении фазы света при прохождении через различные структуры клеток. При использовании фазово-контрастной микроскопии луч света проходит препарат с микроорганизмами и попадает на детектор. В тех случаях, когда луч света падает на прозрачные структуры фаза света меняется, что приводит к возникновению контраста на изображении. Этот метод позволяет наблюдать различные структурные детали клеток микроорганизмов необходимости окрашивания препарата. без Фазово-контрастная микроскопия также позволяет исследовать живые клетки в реальном времени, следить за их динамикой и просматривать процессы, происходящие внутри клеток. Однако он имеет ограничения в разрешении, что может снизить возможность наблюдения мельчайших структур и деталей внутреннего строения микроорганизмов [2].

Дифференциальная интерференционная контрастная микроскопия позволяет визуализировать образцы с высоким контрастом и богатой детализацией. В данном виде микроскопии свет, проходящий через образец, разделяется на два параллельных луча. Эти лучи проходят через оптические элементы микроскопа и встречаются в объективе, где происходит интерференция. Разница в фазе между двумя лучами приводит к изменению интенсивности света на изображении, что создает контрастное изображение. Преимущество заключается в том, что данный метод позволяет наблюдать тонкие структуры клеток, а также слабо отражающие и прозрачные объекты, которые трудно визуализировать другими методами. Этот метод также обеспечивает трехмерное изображение образца, что даёт более детальное представление о его структуре. В недостатках метода можно выделить необходимость аккуратной настройки оборудования и чувствительность к небольшим изменениям в образце или окружающей среде [2].

Флуоресцентная микроскопия является методом, основанным на использовании флуорофоров. (Наиболее распространенные вещества, используемые во флуоресцентной микроскопии, включают в себя флуорофоры на основе фталоцианина, бодипи, карбоцианина). Суть метода заключается в следующем: на образец наносится специальный краситель (для обнаружения или перечисления микроорганизмов в жидких и нежидких образцах (используются такие красители, акридиновый оранжевый (АО), DAPI, тетраметил-родаминэтил-эфир (TMRE), флуоресцеин-изотиоцианат (FITC) и цианодитолил-тетразолий хлорид (СТС)), затем происходит облучение светом, возбуждающим электроны молекул красителя и вызывающим свечение. После этого флуоресцентные молекулы испускают свет с другой длиной волны, который обнаруживается и фиксируется микроскопом. Данный метод позволяет идентифицировать и визуализировать конкретные молекулярные компоненты внутри микроорганизмов (такие как ДНК, РНК, белки и липиды), используется в микробиологии для изучения взаимодействия микроорганизмов с окружающей средой и другими клетками. Однако для применения данного метода микроскопии необходимы не самые дешёвые вещества и специализированных оборудования, что накладывает определённые ограничения на его (свободное) использование [2].

Электронная микроскопия использует пучок электронов вместо света для создания изображений. Трансмиссионная электронная микроскопия позволяет изучать внутреннюю структуру микроорганизмов, в то время как сканирующая электронная микроскопия обеспечивает трехмерное изображение поверхности образца.

Далее рассмотрим виды электронной микроскопии. Начнём со **сканирующей** электронной микроскопии (СЭМ): в данном методе используется пучок электронов, сканирующий поверхности образца и создающий изображения с высоким разрешением. Образец облучается, и отражённые или отклонённые электроны регистрируются детектором, что позволяет получить трёхмерное изображение поверхности образца с высокой детализацией. СЭМ позволяет исследователям изучать такие характеристики поверхностей микроорганизмов, как форма, размер и текстура, (являющиеся важными для понимания их функциональных свойств и взаимодействия с окружающей средой). Однако для подготовки биологических образцов к анализу через СЭМ часто требуется напыление тонким слоем металла или углерода, обеспечивающее проводимость образца и предотвращающее его повреждение или искажение его структуры под воздействием электронного пучка.

Для анализа образцов с помощью **трансмиссионной электронной микроскопии** (**ТЭМ**) используется пучок электронов, который проходит через тонкий срез образца, создавая изображение его внутренней структуры. Затем изображение формируется на экране или детекторе. Данный метод позволяет исследователям изучать такие характеристики структуры микроорганизмов, как клеточные органеллы, ядра и вирусные частицы. ТЭМ важна для понимания молекулярных механизмов биологических процессов. Однако подготовка образцов для их последующего анализа с помощью данного метода требует отделения ультратонкого среза образцов и их обработки специальными фиксативами, а это в свою очередь приводит к потере некоторых деталей структуры и её искажению. Кроме того, ТЕМ может быть затруднен в использовании для живых или подвижных микроорганизмов из-за необходимости в подготовке образцов [3].

Криоэлектронная микроскопия позволяет изучать биологические образцы при низких температурах, обеспечивая сохранение их структуры и уменьшая неточности, связанные с обработкой результатов. Образцы подвергаются быстрой заморозке до очень низких температур с использованием жидкого азота или жидкого азота с жидким гелием, что сохраняет их биологическую активность и структуру. Данный метод является мощным инструментом для изучения структуры микроорганизмов на молекулярном уровне. Она позволяет получать качественные и точные изображения, а её использование возможно без фиксации, окраски образцов, что особенно важно для сохранения их характеристик. Кроме того, криоэлектронная микроскопия может использоваться для изучения биологических молекул, таких как белки и нуклеиновые кислоты, в контексте микроорганизмов, однако процесс подготовки образцов к криоэлектронной микроскопии требует специализированных навыков и оборудования, а также может потребовать дополнительного времени и усилий [4].

Теперь перейдём к молекулярным методам, которые позволяют установить не морфологические особенности исследуемой культуры, а строение и состав её генотипа. Полимеразная цепная реакция (ПЦР) — это метод, позволяющий увеличить количество определённых участков ДНК в образце до миллионов копий. Этот процесс основан на способности фермента ДНК-полимеразы к синтезу новых строительных блоков ДНК в присутствии нуклеотидов и коротких однонитевых кусков ДНК, называемых праймерами. ПЦР включает в себя циклическое нагревание и охлаждение образца с последующим удлинением ДНК в каждом цикле, в котором происходят три основных этапа: денатурация, аннелирование праймеров и удлинение ДНК ферментом ДНК-полимеразой. После каждого цикла количество ДНК удваивается, что приводит к экспоненциальному увеличению числа копий исходного участка. Данный метод широко используется в микробиологии для диагностики инфекций, выявления генетических мутаций, изучения генетических вариаций микроорганизмов, а также для идентификации определенных генов или генетических последовательностей. Этот метод чрезвычайно чувствителен и позволяет детектировать даже небольшие количества ДНК, что

делает его важным инструментом в микробиологических исследованиях. Однако, стоит отменить, что ПЦР может быть восприимчив к контаминации ДНК, что может привести к ложноположительным результатам. Кроме того, некоторые области ДНК могут быть трудны для амплификации из-за своей структуры или содержащихся в них ингибиторов. Также важно учитывать, что результаты ПЦР могут зависеть от качества используемых реагентов и условий проведения реакции [2].

Секвенирование генома – это процесс определения последовательности нуклеотидов в геноме организма. Это важный метод, позволяющий изучать структуру генома, выявлять генетические вариации и идентифицировать такие функциональные элементы, как гены и регуляторные участки. Современные методы секвенирования позволяют анализировать миллионы фрагментов ДНК одновременно, что обеспечивает высокую скорость и эффективность анализа геномов. Данный метод играет ключевую роль в микробиологии, позволяя изучать генетический состав и структуру микроорганизмов на молекулярном уровне. Секвенирование генома используется для идентификации генов, связанных с патогенностью, антибиотикорезистентность И другими характеристиками микроорганизмов. секвенирование генома позволяет изучать эволюционные отношения между различными штаммами и видами микроорганизмов. Однако для использования данного метода требуется наличие дорогостоящего оборудования для анализа и интерпретации полученных данных. Кроме того, обработка и анализ больших объемов данных, сгенерированных в результате секвенирования, может быть сложной задачей. Также важно учитывать, что результаты секвенирования могут быть подвержены ошибкам, таким как неправильное сборка или интерпретация последовательностей, а также наличие контаминации ДНК [2].

Метод культуральной оценки в микробиологии представляет собой процесс выращивания микроорганизмов на специальных питательных средах в контролируемых условиях. Этот метод основан на создании оптимальных условий для роста и размножения микроорганизмов на питательных средах, содержащих необходимые питательные вещества. Для выращивания микроорганизмов используются различные типы сред, подбираемые в зависимости от метаболических особенностей микроорганизмов и требований к окружающей среде. Метод культуральной оценки широко применяется для изучения микробных сообществ, выявления патогенных микроорганизмов, исследования их морфологии, физиологии и поведения. Он также используется для изоляции новых видов микроорганизмов и их культивирования для проведения дальнейших исследований: анализ генома, биохимические тесты, оценка чувствительности к антибиотикам. Одним из основных ограничений данного метода является требовательность многих микроорганизмов к питательной среде и условиям культивирования. Стоит отметить, что представления о микробной популяции могут измениться, так как мы можем выращивать только те виды, которые способны адаптироваться к условиям искусственного выращивания. Кроме того, некоторые микроорганизмы могут менять свои физиологические и морфологические характеристики при культивировании, что может исказить результаты исследований [2].

Применение методов машинного обучения в идентификации и классификации микроорганизмов представляет собой современную и перспективную область исследований в микробиологии. Традиционные методы идентификации, основанные на морфологических, биохимических и физиологических характеристиках, имеют свои ограничения в точности и скорости. Развитие вычислительной техники и алгоритмов машинного обучения даёт возможность создания более точных и эффективных моделей для автоматизированной идентификации микроорганизмов. Методы машинного обучения, такие как нейронные сети, алгоритмы классификации и кластеризации, методы обработки изображений и анализа последовательностей ДНК/РНК, позволяют обрабатывать большие объемы данных и выявлять характерные признаки, что способствует более точной и быстрой идентификации различных видов микроорганизмов [1]. Такие инновационные подходы к идентификации могут иметь огромное значение для медицины, экологии, пищевой промышленности и других областей, где важна точная и оперативная оценка микробиоты. В частности, достаточно популярным является

применение методов машинного обучения в микроскопии, где алгоритмы обнаружения и классификации микроорганизмов на изображениях позволяют автоматически анализировать образцы с высокой точностью и скоростью. Это особенно полезно в клинической диагностике, где оперативное обнаружение и идентификация патогенов играют критическую роль в лечении инфекционных заболеваний. Кроме того, машинное обучение позволяет улучшать процессы контроля качества в промышленности, где необходимо отслеживать микроорганизмы, влияющие на производственные процессы и безопасность продукции. Этот подход также помогает в экологических исследованиях, где важно постоянно отслеживать изменения в микробном сообществе в различных средах и оценивать их воздействие на окружающую среду и здоровье человека. Таким образом, применение методов машинного обучения в микроскопии открывает новые перспективы для быстрой, точной и автоматизированной идентификации и классификации микроорганизмов в различных областях науки и промышленности [5].

На данный момент существует множество методов для распознавания и классификации микроорганизмов. Кроме того, наука продолжает активно развиваться, открывая новые возможности и перспективы. Разработка новых методов является крайне актуальной задачей, поскольку их создание позволяет нам расширять знания о микробном мире, улучшать диагностику инфекционных заболеваний и методы их лечения, разрабатывать эффективные методы контроля за микробиотой окружающей среды. Кроме того, инновационные методы распознавания и классификации микроорганизмов могут играть ключевую роль в развитии новых методов биотехнологии, медицины и экологии.

Таким образом, постоянное совершенствование и разработка новых методов в области распознавания и классификации микроорганизмов — важный фактор, влияющий на прогресс в научных и прикладных исследованиях и способствующий развитию науки и улучшению качества жизни.

Список использованных источников

- 1. Здравоохранение в России. 2023: Стат.сб./Росстат. M., 2023. 179 с.
- 2. Литусов Н.В. Бактериоскопические методы исследования. Иллюстрированное учебное пособие. Екатеринбург: Изд-во ГБОУ ВПО УГМУ, 2015. 55 с.
- 3. Герасимов В.Н., Маринина Н.Н., Харсеева Г.Г., Щербатая О.С. Возможности трансмиссионной электронной микроскопии в оценке качества клеток бактерий и микробной популяции // Клиническая лабораторная диагностика. − 2022. №. 67 (4). С. 237–243.
- 4. Градов О.В., Градова М.А. Криоэлектронная микроскопия как инструмент системной биологии, структурного анализа и экспериментального воздействия на клетки. Комплексный аналитический обзор новейших работ // Реферативный журнал ВИНИТИ сер. Биология. − 2014. − №. 23 (3). − 12 р.
- 5. Saurabh K., Gauri S.M. Rapid Detection of Microorganisms Using Image Processing Parameters and Neural Network // Food Bioprocess Technol. − 2021. − №. 3. − Pp. 741–751.

УДК 664.66.002.38

ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ УРОВНЯ САХАРА В РЕЦЕПТУРАХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ

Чаплина А.А.¹ (студент), **Сысоева П.В.**¹ (аспирант) **Научный руководитель** – к.т.н. **Иванова В.А.**¹

1 – Университет ИТМО

e-mail: lnast@mail.ru

В работе описаны основные виды сахарозаменителей, благодаря использованию которых можно повысить качество готовых изделий и расширить их ассортимент, а в некоторых случаях даже снизить себестоимость продукции. Рассматриваются источники получения сахарозаменителей, рекомендации по использованию и возможные ограничения.

Ключевые слова

Сахарозаменители, хлебобулочные изделия, источники получения сахарозаменителей, противопоказания, показания к применению сахарозаменителей.

На сегодняшний день снижение уровня сахара в пищевых продуктах является достаточно актуальной задачей. Отдельные заменители сахара улучшают пищеварение, имеют низкую калорийность, не оказывают негативного воздействия на здоровье зубов, а в некоторых случаях даже снижают риски развития ряда заболеваний (ожирение, сахарный диабет 2 типа, сердечнососудистые заболевания) [1]. Потребителей привлекают продукты со сниженным содержанием сахара или без его добавления, поэтому в настоящее время производители ориентированы на выпуск таких продуктов питания.

Заменители сахара можно разделить на натуральные и синтетические. По органолептическому профилю сахарозаменители могут отличаться друг от друга интенсивностью сладкого вкуса, наличием или отсутствия послевкусия. Для оценки сладости сахарозаменителя для сравнения всегда используют сладость сахарозы, которую принимают за 100% [2].

В таблице приводится информация об основных, используемых в пищевой промышленности, сахарозаменителях.

Таблица
Основные характеристики сахарозаменителей, используемых в пищевой
промышленности [3-13]

Название сахарозамени- теля	Способы и источники получения	Сфера применения	Ограничения	Относительная сладость, % от сладости сахарозы
Фруктоза	Находится в	Применяется в	Не следует	120
	плодах и ягодах,	пищевых продуктах	употреблять	
	меде. Получают	для больных	более 40 гр в	
	гидролизом	сахарным диабетом,	сутки, может	
	сахарозы,	так как вызывает	вызвать	
	крахмала,	лишь	эндокринные	
	инулина	незначительное	нарушения,	
		повышение уровня	ожирение,	
		сахара в крови	сахарный диабет	
			и другие	
			заболевания	

Продолжение таблицы

			Τ τρο <i>μ</i>	должение таблицы Потионители изг
Название	Способы и			Относительная
сахарозамени-	источники	Сфера применения	Ограничения	сладость, % от
теля	получения		•	сладости
	-	D		сахарозы
Тагатоза	Получают	Возможно	При	92
	ферментативным	применение во	определенных	
	гидролизом	многих пищевых	дозировках	
	лактозы	продуктах, но	обладает	
		следует учитывать,	слабительным	
		что тагатоза	действием,	
		участвует в реакции	поэтому	
		Майяра и при	рекомендованная	
		длительном	норма	
		воздействии	потребления для	
		высоких температур	взрослого – не	
		в продукте может	более 40 гр в	
		появиться	сутки. В России	
		неприятное горькое	не используется	
		послевкусие		
Изомальтулоза	Получают	В качестве	Отсутствуют	50
(палатиноза)	ферментативной	сахарозаменителя		
	изомеризацией	применяется в		
	сахарозы	производстве		
		кондитерских и		
		шоколадных		
		изделий, так как		
		безопасна для зубов		
		и хорошо		
		переносится		
		человеком		4.5
Трегалоза	Содержится в	Используется в	Отсутствуют	45
	грибах, меде и	качестве добавки в		
	креветках.	сушеных овощах и		
	Промышленно	фруктах для		
	получают	сохранения		
	трегалозу из	органолептических		
П	крахмала	характеристик	0	10
Полидекстроза	Получают	Применяется в	Отсутствуют	10
	полимеризацией	производстве		
	глюкозы /	низкокалорийных		
	декстрозы	пищевых		
		продуктов, в том		
		числе кондитерских		
Илучии	Полимотот на	изделий	Darcoverywords	10
Инулин	Получают из	Применяется в	Рекомендуемая	10
	корнеплодов	изделиях без	норма	
	растений, чаще -	добавления сахара. Часто в сочетании с	потребления	
	из корня цикория		инулина для	
		сахарными	взрослого	
		спиртами или фруктозой	человека составляет 10 гр	
		фруктозон	_	
	I		в сутки	

Продолжение таблицы

			Προμ	должение таблицы
Название	Способы и			Относительная
сахарозамени-	источники	Сфера применения	Ограничения	сладость, % от
теля	получения		•	сладости
		П	0.7	сахарозы
Сорбит	Получают путем	Применяется при	Обладает	60
	гидрирования	производстве	слабительным	
	глюкозы.	диабетических	действием,	
	Содержится в	кондитерских	поэтому суточная	
	плодах рябины,	изделий,	норма для	
	яблоках и	жевательной	взрослого	
	абрикосах	резинки	человека	
			составляет не	
TC	П	П	более 40 гр	100
Ксилит	Получают	Полезен как	Может обладать	100
	методом	некариесогенный	слабительным	
	кислотного	подсластитель,	действием, норма	
	гидролиза	например, в	для взрослого	
	лигноцеллюлозн	жевательной	человека – не	
	ой биомассы или	резинке, молочных	более 40 гр в	
	промышленной	конфетах – в	сутки	
	ферментацией.	продуктах вязкой		
	Содержится во	консистенции		
	фруктах (слива),			
	ягодах			
	(клубника),			
	овощах (цветная			
	капуста), а также			
	в древесине березы, бука			
Эритрит	Присутствует в	Используется в	Максимальное	70
Эритрит	овощах и	рецептурах	суточное	70
	фруктах, в	низкокалорийных	потребление для	
	промышленности	мучных	взрослого	
	получают	кондитерских	человека – 45 гр,	
	сбраживанием	изделий	большие дозы	
	глюкозы	подолни	могут привести к	
	осмофильными		расстройству	
	дрожжами		пищеварения	
Мальтит	Получают	Используют в	Отсутствуют	80
1.1	гидрированием	кондитерских		
	мальтозы,	изделиях для		
	полученной из	больных диабетом,		
	картофельного	а также при		
	или кукурузного	производстве		
	крахмала	продуктов с		
	1	пониженным		
		содержанием		
		углеводов		
	L	, , , , , , , , , , , , , , , , , , ,	1	l

Продолжение таблицы

Название сахарозамени- теля	Способы и источники получения	Сфера применения	Ограничения	Относительная сладость, % от сладости сахарозы
Изомальт	Получают изомеризуя сахарозу в изомальтулозу, с последующим гидрированием	Используют в производстве кондитерских изделий, которые не вызывают кариеса и обладают пониженным гликемическим индексом	Отсутствуют	45
Лактит	Получают каталитическим гидрированием лактозы	Входит в состав низкокалорийных и диетических продуктов	Превышение суточной нормы (50 г/сут) вызывает нарушение работы желудочно-кишечного тракта	35
Стевиозид	Содержится в листьях стевии	Применяют при производстве конфет, жевательной резинки, выпеченных изделий и зерновых завтраков, йогурта и мороженого	С 1 февраля 2024 года в РФ по обновленному ТР ТС 029/2012 данный сахарозаменитель запрещен	150

Данные, представленные в таблице, демонстрируют широкий перечень сахарозаменителей. Следует отметить тот факт, что благодаря использованию некоторых сахарозаменителей можно получить продукты со сниженным содержанием сахара, обладающие дополнительными лечебно-профилактическими свойствами. Это позволяет расширить круг потребителей и повышать спрос на такие изделия.

Список использованных источников

- 1. Aylin W. Sahina, Emanuele Zanninia, Aidan Coffeyb, Elke K. Arendt Sugar reduction in bakery products: Current strategies and sourdough technology as a potential novel approach // Elsevier. 2019. Pp. 1–17.
- 2. Чимонина И.В., Лисицына А.С. Анализ безопасности использования диабетических добавок // Kant. -2016. -№ 2 (19). C. 4–7.
- 3. Четверикова О.П. Сырье и ингредиенты хлебопекарного и кондитерского производства. Санкт-Петербург: Профессия, 2018. 664 с.
- 4. Сербаева Э.Р., Якупова А.Б., Магасумова Ю.Р., Фархутдинова К.А., Ахметова Г.Р., Кулуев Б.Р. Инулин: природные источники, особенности метаболизма в растениях и практическое применение // Биомика. 2020. Т.12(1). С. 57–79.
- 5. Громова О.А., Ребров В.Г. Сахарозаменители. Вопросы эффективности и безопасности применения // Трудный пациент. 2007. №. 12–13. С. 47–49.
- 6. Штерман С.В., Тужилкин В.И., Манеров Ю.В. Эритол натуральный сахарозаменитель XXI века // Пищевая промышленность. 2008. № 8. С. 24–25.
- 7. Шубина О.Г. Полидекстроза многофункциональный углевод для создания

- низкокалорийных и обогащенных продуктов // Пищевая промышленность. -2005. №.5. С. 28-31.
- 8. Чистова М.В. Приготовление пшеничного теста с инулином // Пищевая промышленность. -2012. -№. 7. C. 46–47.
- 9. Рубан Н.В., Туманова А.Е., Рысева Л.И. Кексы с инулином для здорового питания // Хранение и переработка сельхозсырья. 2021. №. 2. С. 99–108.
- 10. Ткешелашвили М.Е., Бобожонова Г.А., Сорокина А.В. Разработка кондитерских изделий обогащенных белком // Хранение и переработка сельхозсырья. 2019. №. 1. С. 57–65.
- 11. Баранов Б.А., Бондаренко Д.С., Шишкина Д.И. Натуральный сахарозаменитель изомальт, его свойства и особенности, роль в функциональном питании // Евразийский научный журнал. 2015. №. 11. С. 352–354.
- 12. Резниченко И.Ю., Щеглов М.С. Сахарозаменители и подсластители в технологии кондитерских изделий // Техника и технология пищевых производств. -2020. -№. 4. C. 576–587.
- 13. Технический регламент Таможенного союза «Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств» № ТР ТС 029/2012: сайт Евразийской экономической комиссии. 2012 [Электронный ресурс]. URL: ТР ТС 029/2012 Технический регламент Таможенного союза "Требования безопасности пищевых добавок, ароматизаторов и технологических вспомогательных средств" от 20 июля 2012 docs.cntd.ru (дата обращения: 14.03.2024).

УДК 581.6

EFFECTS OF SALVIA OFFICINALIS ENCAPSULATED WITH SOY PROTEIN ISOLATE NANOPARTICLES

Шарабати A.¹ Scientific Supervisor – Еремеева Н.Б.¹

1 – ITMO University

e-mail: abdullahsharabati1@hotmail.com

Работа выполнена в рамках темы НИР 623095 «Создание биополимерных наночастиц для инкапсуляции активных компонентов лекарственных растений».

In our work we are developing encapsulates by integrating *Salvia officinalis* (sage) into a delivery system of choice, soy protein isolate (SPI). Both sage and SPI are known to possess health benefits to the human body and other properties that are useful in food biotechnology, however, to each is their limitations, and hence the encapsulation. It's brought about by process of dissolving and extracting, mixing, drying, then assessing for antioxidant activity, phenolics, and flavonoids, then comparing, in addition to testing on different foods and observing the resultant food preservation/spoilage behavior.

Keywords

Encapsulation, Salvia officinalis, soy protein isolate, delivery system, antioxidant activity, phenolics, flavonoids, food preservation.

Although synthetic food additives and antioxidants have been greatly and successfully employed in different foods and played a major role in preserving food and reducing food waste, several negative effects and potential impacts on human health have been, experimentally and observationally, linked to them, including toxicity and carcinogenesis [1]. As a result, research work has moved toward healthier and safer alternatives, namely bioorganic substances. Several substances isolated from plant and animal sources have been found to exhibit antibacterial and antioxidant activities, along with their thermal stability and high barrier properties, namely against oxygen and water vapor, in addition to their renewability, biodegradability, and non-toxicity; rendering them not only healthier, but also more efficient replacements for synthetic chemical antioxidants and plastics used for food preservation, while at the same time being abundantly available. These molecules include bioactive compounds in essential oils from aromatic plants, such as oregano, thyme, rosemary, basil, cinnamon, peppermint, clove, garlic, ginger, and sage [2], and other plant-based phenolic compounds and extracts, in addition to zein, whey protein isolates (WPI), soy protein isolates (SPI), and other protein isolates, as well as other naturally-occurring polymers, such as starch [3].

However, and due to the non-feasibility of such substances when applied alone due to several limitations, it is important to combine two or more substances in one complex (encapsulate) to achieve a maximum level of applicability and benefits, given that the substances themselves possess many positive effects that can be lost through the process of encapsulate formation. Nevertheless, successful encapsulation may result in not only maintaining a good level of antioxidant and other natural properties found in the substances, but also enhancing their bioavailability, in addition to improving their applicability as food additives where they can ideally show a higher level of chemical and thermal stability, antioxidant activity, solubility, insensitivity to oxygen and light, hydrophobicity, and water barrier properties, as well as less volatility; where typically a plant-based substance is loaded onto a protein or another polymer that can function as a delivery system.

At a first glance, the processes may look quite simple: dissolving the two or more substances separately in suitable solutions then mixing them, after extraction or filtration, under a certain temperature for a certain duration while keeping them in the dark constantly stirring, selectively

evaporating the solutions and retaining the solutes, deep-freezing the resultant mixture, drying it, then measuring and assessing antioxidant and antibacterial activities and other properties and comparing them to those of the substances in a natural state and testing the encapsulates for their preservative properties through different assays and by applying them on certain foods. Main challenges, though, are there to face and solve, mainly in terms of selecting the substances and the amounts and ratios of them, temperatures, pH, and durations of dissolving, mixing, and other processes, and the selection of food on which to test them, requiring thorough knowledge of the chemical properties of the substances themselves, the solutions used, the food samples selected, and how the body reacts with them. Thus, scientific experiments about encapsulation are continuing to take place, and there is always a potential to find alternative modification methods that are better or more feasible.

One of such encapsulates was proposed by [4], where *Litsea cubeba* essential oil (LCEO) was complexed with soy protein isolate (SPI), selected thanks to its high ratio (> 60%) of hydrophobic bioactive substances, rendering it an ideal delivery material. In attempts to optimize the proposed system, the nanoparticles prepared by LCEO and SPI (LSNPs) were compounded in a lentinan edible film. Encapsulates were prepared through dissolving SPI in deionized water and LCEO in absolute ethanol, then mixing the two solutions, then freeze-drying them, after which nanofilms were made by heating and mixing with glycerin. After testing the nanofilm on beef, observing using scanning electron microscopy (SEM), and assessing its antioxidant activity, antibacterial activity against *Staphylococcus aureus* (*S. aureus*) and *Escherichia coli* (*E. coli*), and other physical properties, results showed successful complexation and modification, which generally enhanced barrier properties, antioxidant and antibacterial activities, and other physical properties, such as thickness and opacity.

Another encapsulate was developed by [5], where curcumin was loaded with SPI. This was achieved through dropwise addition of curcumin solution (dissolved in ethanol) into SPI solution (dissolved in distilled water), after which the mixture was stirred in the dark, then evaporated to remove ethanol, then centrifuged to remove free curcumin. A soy soluble polysaccharide (SSPS) was also prepared by dissolving it in distilled water, stirring and leaving it overnight, then centrifuging it. After the preparation of curcumin-SPI nanocomplexes containing SSPS, others containing maltodextrin, and others not containing SSPS or maltodextrin, the mixtures were spray-dried under a temperature of 150 °C, then placed in airtight glasses containing phosphorus pentoxide. The developed nanocomplexes were assessed for retention of curcumin, dissolution and redispersion behavior, microstructural morphology using SEM, crystallinity of curcumin, stability of curcumin during in vitro digestion, and antioxidant and anti-cancer activities. In the end of the study, spray-dried curcumin-SPI encapsulation showed a very little curcumin loss and an increase in loading amount and retention of curcumin, indicating a high effectiveness, which was enhanced by the addition of SSPS or maltodextrin. Encapsulates loaded with SSPS or MD showed a high level of water solubility than non-loaded ones, as well as a higher encapsulation performance due to the high number of solid contents in SSPS and MD. All the encapsulates exhibited a better crystallinity of curcumin as transformation of curcumin from a crystalline to a microcrystalline or amorphous state took place. A high stability of encapsulates against degradation during in vitro digestion, where addition of SSPS or MD showed even a higher level of stability, however, bioaccessibility in encapsulates was considerably less than in free curcumin and SPI samples. Although the encapsulation process enhanced the curcumin's antioxidant activity, both encapsulated and free curcumin showed a high level of cytotoxicity activity, which was highly dependent on curcumin's concentration, where at high concentrations of curcumin in the nanocomplex showed less cytotoxicity than free curcumin.

In our work, we are working on encapsulating SPI with *Salvia officinalis* (sage) by following similar methods of dissolving, extraction and filtration, mixing, evaporation, freezing, drying, then testing the resultant encapsulates for their phenolic compounds, flavonoids, antioxidant activity, and thermal and *in vitro* digestion stability. The work is intended to improve sage's usage and applicability in food preservation through complexing with SPI and assessing the sage's properties and its levels of antioxidant activity, flavonoids, and phenolic compounds before and after encapsulation, as well as to test its stability during hating and digestion, where we anticipate to find a generally better performance of encapsulated sage and better food preservative properties, which is to be assessed via adding the encapsulate to different foods and observing the spoilage behavior and time required.

References

- 1. Chen F.-P., Liu L.-L., Tang C.-H. Spray-drying microencapsulation of curcumin nanocomplexes with soy protein isolate: Encapsulation, water dispersion, bioaccessibility and bioactivities of curcumin // Food Hydrocolloids. 2020. T. 105. P. 105821.
- 2. Cui H. et.al. Effect of soy protein isolate nanoparticles loaded with litsea cubeba essential oil on performance of lentinan edible films // International Journal of Biological Macromolecules. 2023. T. 242. C. 124686.
- 3. Gutiérrez-del-Río I. и др. Terpenoids and Polyphenols as Natural Antioxidant Agents in Food Preservation // Antioxidants. 2021. Т. 10. № 8. Рр. 1264.
- 4. Samadani F., Behzad T., Enayati M. S. Facile strategy for improvement properties of whey protein isolate/walnut oil bio-packaging films: Using modified cellulose nanofibers // Int J Biol Macromol. 2019. T. 139. Pp. 858–866.
- 5. Zhang L., Piao X. Use of aromatic plant-derived essential oils in meat and derived products: Phytochemical compositions, functional properties, and encapsulation // Food Bioscience. 2023. T. 53. P. 102520.

C Po	одержание обототехника и искусственный интеллект	. 6
	Bassel Alshawareb FEW-SHOT VISUAL ANOMALIES DETECTION IN INDUSTRIAL ENVIRONMENTS FROM QUADCOPTERS ON-BOARD SENSORS	
	Муратов С.Ю. ФОРМИРОВАНИЕ ЕДИНОГО ВЕКТОРА ПРИЗНАКОВ ДЛЯ ДАННЫХ СИСТЕМ МОНИТОРИНГА И ЖУРНАЛИРОВАНИЯ	11
	Топольницкий А.А. РАЗБОР ПОДХОДОВ ОПТИМАЛЬНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ НЕИЗВЕСТНОГО ОКРУЖЕНИЯ 1	16
C	истемы управления и электроинженерия	21
	Бездетко А.В., Тимочкин С.А. ПЕРЕХОД ОТ ОЦЕНИВАНИЯ УКЛОНЕНИЯ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ НА ТРАЕКТОРИИ К ОЦЕНИВАНИЮ УКЛОНЕНИЯ ОТВЕСНОЙ ЛИНИИ НА ПЛОЩАДИ ИНЕРЦИАЛЬНО- ГЕОДЕЗИЧЕСКИМ МЕТОДОМ	22
	Власова М.А., Шевченко А.Н. АНАЛИЗ ПРИЧИН ВОЗНИКНОВЕНИЯ ФАЗОВОЙ ЗАДЕРЖКИ ВО ВХОДНОМ СИГНАЛЕ СИНХРОННОГО ДЕТЕКТОРА УСТАНОВКИ ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ГАЗОВЫХ ЯЧЕЕК	26
	Живицкий А.Ю., Захаров Д.Н., Куровский А.М., Куровский Д.М. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ПЛАНИРОВАНИЯ ДВИЖЕНИЯ МАНИПУЛЯЦИОННОГО РОБОТА С НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЯМИ	30
	Завитаев А.С., Евстифеев М.И. ТОПОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ОПТИЧЕСКИХ ЯЧЕЕК КВАНТОВОГО ДАТЧИКА ВРАЩЕНИЯ.	35
	Захаров Д.В. ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИАГЕНТНЫХ СИСТЕМ НА ОСНОВЕ БОЛЬШИХ ЯЗЫКОВЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ РЕШЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ	39
	Панин А.Д., Захаров Д.Н., Живицкий А.Ю. ИССЛЕДОВАНИЕ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ СЛЕЖЕНИЯ ЗА КУРСОМ НАДВОДНОГО СУДНА	42
	Патрашевский А.А., Коваленко П.П., Маматов А.Г. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПРИВОДА ДЛЯ БИОНСПИРИРОВАННОГО ПОДВОДНОГО РОБОТА-ЧЕРЕПАХИ	51
	Сорокина А.А. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ ВЕТРОЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА МАГНУСА	57
	Шишков К.О. ТЕХНОЛОГИЯ VEHICLE-TO-GRID (V2G) ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ УСТОЙЧИВЫМ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕМ: СОВРЕМЕННЫЙ ОБЗОР	61
	Яременко А.М. ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ МАШИНА: МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПОВЕРХНОСТИ НАМАГНИЧИВАНИЯ	66
M	Гультимедиа-технологии, дизайн и юзабилити	
	Липаева К.С., Иванчура А.В. СОЗДАНИЕ РЕАЛИСТИЧНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ МЕТОДОМ СТОХАСТИЧЕСКОЙ ТРАССИВОВИИ ЛУПЕЙ	71

	Машина Е.А., Балакшин П.В. ИСПОЛЬЗОВАНИЕ СЕМАНТИЧЕСКОГО АНАЛИЗА СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫХ КОЛЛЕКЦИЙ ТЕКСТОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПРОФЕССИОНАЛЬНЫХ КОМПЕТЕНЦИЙ СПЕЦИАЛИСТА	75
	Пономаренко Е.А., Меженин А.В. АЛГОРИТМЫ СОЗДАНИЯ HDR ИЗОБРАЖЕНИЙ	80
	Тонкоглаз А.С., Меженин А.В. АНАЛИЗ ПОДОБИЯ ГЕОМЕТРИЧЕСКОЙ ФОРМЫ 3D-МОДЕЛЕЙ	85
	Махиня Д.А., Меженин А.В. МОДИФИЦИРОВАННЫЙ АЛГОРИТМ ПРОРЕЖИВАНИЯ ОБЛАКОВ ТОЧЕК НА ОСНОВЕ МЕТРИКИ ХАУСДОРФА	89
Π	рограммная инженерия и компьютерные технологии	94
	Enkomaryam B.C. UNSUPERVISED LEARNINGT FOR PRENATAL CARE FROM OBSTETRIC RECORDS	95
	Живицкий А.Ю., Захаров Д.Н., Бершак Н.В., Ларченков А.А. ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ И НЕПРЯМОЕ АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКИ ПОЗИЦИОНИРУЕМЫМ НАДВОДНЫМ СУДНОМ	99
	Власенко Н.А. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ КОНТЕНТА ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ПРЕЗЕНТАЦИЙ	. 106
	Волобуев И.К. ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОБЛЕМ И ТЕНДЕНЦИЙ В СФЕРЕ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ЭЛЕВАТОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ	. 109
	Горшков П.В. НОВЫЙ ПОДХОД К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	. 113
	Зимовин А.А. ИНТЕГРАЦИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА И ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ ДЛЯ АВТОМАТИЗАЦИИ ЖИЛИЩНОГО ПРОСТРАНСТВА	. 117
	Кальвияйнен Я.О. МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ ОБЛАКОВ ТОЧЕК С ПОМОЩЬЮ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	. 122
	Климакова Т.Ф. ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДОВ МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СТОМАТОЛОГИИ	. 127
	Милантьев С.А., Бессмертный И.А. ГЕНЕРАЦИЯ МЕДИЦИНСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ РЕДКИХ КЛАССОВ С ПОМОЩЬЮ GAN И DIFFUSION МОДЕЛЕЙ	. 131
	Нагоев А.А. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ ОБЗОР МЕТОДОВ ДЕКОДИРОВАНИЯ АУДИОИНФОРМАЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА АКТИВНОСТИ ГОЛОВНОГО МОЗГА	. 138
	Назаренко В.В., Морщинина Л.В. СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ КОНЦЕПЦИЙ РАЗВЕРТЫВАНИЯ ФРОНТЕНД- ПРИЛОЖЕНИЙ	. 142
	Тихонов Л.А. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ РЕСУРСОВ В CLOUDSIM И KUBERNETES	. 146
	Хаяров Э.А. ОПЕНКА МЕТОЛОВ ЛИСТИЛЛЯНИИ ЛИФФУЗИОННЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ	151

Художников Н.С. ОБЗОР МЕТОДОВ И ТЕХНОЛОГИЙ ТРЕКИНГА ВЗГЛЯДА ДЛЯ МОНИТОРИНГА РАБОТЫ РЕНТГЕНОЛОГА	154
Цыгляев В.М. ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ ПСИХОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ЛИЧНОСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ СОЦИАЛЬНЫХ СЕТЕЙ	159
Чернова Е.А. АНАЛИЗ И РАЗРАБОТКА ПЛАТФОРМ ДЛЯ РАЗМЕЩЕНИЯ ИНФОРМАЦИИ О ПРОЕКТАХ И ПОИСКА КОМАНДЫ ДЛЯ СОВМЕСТНОЙ РАБОТЫ	163
Шагиев С.И. ИССЛЕДОВАНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ИСПОЛНЕНИЮ РАСПРЕДЕЛЁННЫ ЗАДАЧ В ОБЛАЧНОМ ОКРУЖЕНИИ	
Шиян А.С. ЭМПИРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МОДЕЛЕЙ ГЛУБОКОГО ОБУЧЕНИЯ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ БОЛЕЗНЕЙ РАСТЕНИЙ	170
Ян Ц. НЕЙРОСЕТЕВЫЕ МОДЕЛИ НА ОСНОВЕ ВНИМАНИЯ ДЛЯ МУЛЬТИКЛАССОВОЙ КЛАССИФИКАЦИЯ ОПУХОЛЕЙ ГОЛОВНОГО МОЗГА ПО СНИМКАМ МАГНИТНОЙ- РЕЗОНАНСНОЙ ТОМОГРАФИИ	173
Цифровые технологии в индустрии	178
Андреев Ю.С., Басова Т.В. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОГО СОСТОЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО ПАРАМЕТРАМ КАЧЕСТВА ИЗГОТОВЛЕНИЯ ДЕТАЛЕЙ	179
Ремизов Б.К. ПРОМЫШЛЕННЫЙ ИНТЕРНЕТ ВЕЩЕЙ В РАМКАХ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ОПЕРАЦИОННЫХ И ИНФОРМАЦИОННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ НА ПРЕДПРИЯТИИ	183
Muhamad Albani Rizki EXPERIMENTAL PLATFORM FOR LASER BEAM SPOT ASSESSMENT THROUGH COMPUTER VISION METHOD	187
Сясько М.В., Соломенчук П.В. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТОЧНОЙ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ ВИХРЕТОКОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОКРЫТИЯ НА МЕТАЛЛИЧЕСКОМ НЕМАГНИТНОМ ОСНОВАНИИ	191
Шадрина И.Г. РАЗРАБОТКА СПОСОБА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ТРЕХМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКЕ ПРОИЗВОДСТВА	
Шурмелев Д.Д. СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ РАЗВИТИЯ 3D-ПРИНТЕРОВ ДЛЯ ПЕЧАТИ МЕТАЛЛОМ	[207
Фотоника и прикладная оптика	213
Yuandong S. REVIEW AND ANALYSIS OF TECHNIQUES FOR MULTISPECTRAL IMAGE FUSION	214
Кравцов П.А., Емельянова М.А., Рыжова В.А. РАЗРАБОТКА ГИПЕРСПЕКТРАЛЬНЫХ АНАЛИТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИВ НЕЙРОСЕТЕЙ	

	Сурин Д.А., Чистяков В.В. ФОТОРЕФРАКТИВНЫЙ ЭФФЕКТ В ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКИХ ВОЛОКОННЫХ МОДУЛЯТОРАХ СВЕТА	224
Į	еятельность образовательного центра "Энергоэффективные инженерные системы"	. 227
	Аабдани Хуссам ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ С ПРОТОНООБМЕННОЙ МЕМБРАНОЙ	228
	Быханова Т.А. ПРОЕКТИРОВАНИЕ ГАЗОПРОВОДА СРЕДНЕГО И НИЗКОГО ДАВЛЕНИЯ В ГОРОДСКОМ ПОСЕЛКЕ	240
	Гусева Н.С. ОЦЕНКА ПОТРЕБНОСТИ В СПГ УДАЛЕННОГО ПОСЕЛЕНИЯ СИБИРИ	244
	Казанцев Р.А. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВ РАЗВИТИЯ СИСТЕМ НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЙ СЕПАРАЦИИ НА ОБЪЕКТАХ ПОДГОТОВКИ УГЛЕВОДОРОДНЫХ ГАЗОВ	247
	Кольцов Н.С. ФРИКУЛИНГ ПРИ ОХЛАЖДЕНИИ ПОМЕЩЕНИЙ ЦЕНТРОВ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ	251
	Лисин А.В. АНАЛИЗ ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ТЕПЛООБМЕННИКОВ ДЛЯ РЕГАЗИФИКАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕПЛОПОГЛОЩАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ СПГ	257
	Осипова Е.С. ПОДБОР ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЕМКОСТНОГО ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АВТОНОМНОЙ ГАЗИФИКАЦИИ ПОСЕЛЕНИЙ СИБИРИ И ДАЛЬНЕГО ВОСТОКА	261
	Сафтли А. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРОЦЕССОВ В МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ ДВУХФАЗНЫХ СИСТЕМАХ СПГ	274
	Старцев Е.С. МОДЕЛИРОВАНИЕ СХЕМЫ ОЖИЖИТЕЛЯ ПРОДУКЦИОННОГО АЗОТА	279
	Короленко М.В., Тамаров В.В. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРСПЕКТИВНЫХ ВЕЩЕСТВ С ФАЗОВЫМ ПЕРЕХОДОМ ДЛЯ АККУМУЛИРОВАНИЯ ХОЛОДА	282
	Игнатьев С.П., Третьякова В.П. ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ ПРОИЗВОДСТВА СПГ НА КРУПНОТОННАЖНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ	286
	Фатеева Е.С., Соколов М.И. ПОДГОТОВКА МОДЕЛИ РАСЧЕТНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ СТУПЕНИ ЦЕНТРОБЕЖНОГО КОМПРЕССОРА ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ДЛЯ СИСТЕМ ЕГО СЖИЖЕНИЯ	290
	Хмельницкая Д.В. ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛОННЫХ АППАРАТОВ НЕФТЕГАЗОВОЙ ОТРАСЛИ	297
	Шмелькова Т.В. АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ПОЛУЧЕНИЯ СПГ В КРУПНОТОННАЖНОМ ЦИКЛЕ АРКТИЧЕСКИЙ КАСКАД	301
X	имическая инженерия	307
	Gebremaryam Y.Z., Atlaw M.J. CHARACTERIZATION OF THE PHYSICO-MECHANICAL PROPERTIES OF ENSET FIBER REINFORCED COMPOSITE WITH UNSATURATED POLYESTER FOR THE APPLICATION	
	OF FALSE CEILING BOARD	. 308

Вакулюк А.Ю., Михтанюк С.Е., Неелов И.М. КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ФРАГМЕНТОВ АМИЛОИДНЫХ ФИБРИЛЛ 2LMO И 6SHS	312
Нгуен Хоанг Тхань, Олехнович Р.О., Молчановский М.В. ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МОЛЕКУЛЯРНЫХ МАСС ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ НА РЕОЛОГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА, МОРФОЛОГИЮ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЛИГИДРОКСИБУТИРАТ/ПОЛИЭТИЛЕНГЛИКОЛЯ НАНОВОЛОКНИСТЫХ МАТОВ	
Инфохимия	319
Осьмак О.О., Ашихмина М.С., Володарский М.О., Филозоп В.С. ГИДРОКСИАПАТИТНЫЕ ПАТТЕРНЫ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ НОВЫХ ПОДХОДОВ ДИФФЕРЕНЦИРОВКИ БАКТЕРИЙ	320
Безопасность информационных технологий	325
Здорников Е.О. СОВРЕМЕННЫЕ ВЫЗОВЫ И РЕШЕНИЯ В ОБЛАСТИ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПЕРЕДАЧЕ ДАННЫХ ПО РАДИОКАНАЛАМ В БЕСПИЛОТНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВАХ	326
Кича И.В. ПРИМЕНЕНИЕ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ КОНСЕНСУСА В БЛОКЧЕЙНЕ ДЛЯ ОПТИМИЗАЦИИ ХРАНЕНИЯ ДАННЫХ	331
Максимова А.Ю. ОБЗОР И АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ С НУЛЕВЫМ РАЗГЛАШЕНИЕМ, ОСНОВАННЫХ НА ЗАДАЧАХ ПОИСКА ИЗОГЕНИЙ	335
Пикуль А.С. МЕТОД УЛУЧШЕНИЯ ОБНАРУЖЕНИЯ АТАК ПРЕЗЕНТАЦИИ НА БИОМЕТРИЧЕСКУЮ СИСТЕМУ РАСПОЗНАВАНИЯ ЛИЦ С ПОМОЩЬЮ СВЕРТОЧНОЙ СЕТИ С МЕХАНИЗМОМ ВНИМАНИЯ	338
Пимашин Е.Н. РАЗРАБОТКА СРЕДСТВА МОНИТОРИНГА ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ НА ПРИМЕРЕ СКАНЕРА УЯЗВИМОСТЕЙ WEB-ПРИЛОЖЕНИЙ	343
Тимкин А.К. МОДЕЛЬ ДОСТОВЕРНОСТИ ИНФОРМАЦИИ МУЛЬТИАГЕНТНОЙ ГРУППЫ АВТОНОМНЫХ НЕОБИТАЕМЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ ДЛЯ МОНИТОРИНГА МОРСКИХ АКВАТОРИЙ	347
Hajjouz A. OPTIMIZING DOS/DDOS DETECTION IN THE CICIDS DATASET USING ADVANCED MACHINE LEARNING	351
Чапасов П.К. АНАЛИЗ ПРОТОКОЛОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЭЛЕКТРОННОГО ГОЛОСОВАНИЯ С ТОЧКИ ЗРЕНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ПРИНУЖДЕНИЯ	355
Черемухин Д.Н. ТЕХНОЛОГИЯ БЛОКЧЕЙН В ПРИМЕНЕНИИ К УСТРОЙСТВАМ ИНТЕРНЕТА ВЕЩЕЙ	360
Чернов Р.И., Горошков В.А., Островский Д.П. РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ПОВЫШЕНИЯ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ СИСТЕМ И СЕТЕЙ СВЯЗИ ЧЕРЕЗ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ	367
Биотехнологии	370

Антонова А.Д. РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ГОТОВОГО К УПОТРЕБЛЕНИЮ ПРОДУКТА НА ОСНОВЕ РЫБНОГО БУЛЬОНА И РАСТИТЕЛЬНЫХ ИНГРЕДИЕНТОВ	. 371
Володарский М.О., Филозоп В.С., Осьмак О.О. ОЦЕНКА НАКОПЛЕНИЯ МОЛОЧНОЙ КИСЛОТЫ <i>IN SITU</i> ПРИ КУЛЬТИВИРОВАНИИ STREPTOCOCCUS THERMOPHILUS	. 374
Иванова Е. «ЗЕЛЕНЫЙ» СИНТЕЗ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА	. 378
Матыцина В.В., Рухляда К.А. ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА И СПЕКТРАЛЬНОГО СОСТАВА СВЕТА НА РОСТ БИОМАССЫ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ <i>CYANOBACTERIA RIPPKA B-1200</i>	. 382
Николаева Е.С. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНКАПСУЛИРОВАННЫХ ЭКСТРАКТОВ ЧЕСНОКА И ЛУКА	. 385
Рухляда К.А., Матыцина В.В. ПОДБОР ОПТИМАЛЬНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЭКСТРАКЦИИ ПИГМЕНТОВ ИЗ БУРЫХ ВОДОРОСЛЕЙ <i>FUCUS VESICULOSUS</i>	. 388
Санников М.В., Смирнов И.С. МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ И КЛАССИФИКАЦИИ МИКРООРГАНИЗМОВ	. 392
Чаплина А.А., Сысоева П.В. ОСНОВНЫЕ ПОДХОДЫ К СНИЖЕНИЮ УРОВНЯ САХАРА В РЕЦЕПТУРАХ ХЛЕБОБУЛОЧНЫХ ИЗДЕЛИЙ	. 397
Шарабати А. EFFECTS OF <i>SALVIA OFFICINALIS</i> ENCAPSULATED WITH SOY PROTEIN ISOLATE NANOPARTICLES	. 402

Альманах научных работ молодых ученых Университета ИТМО

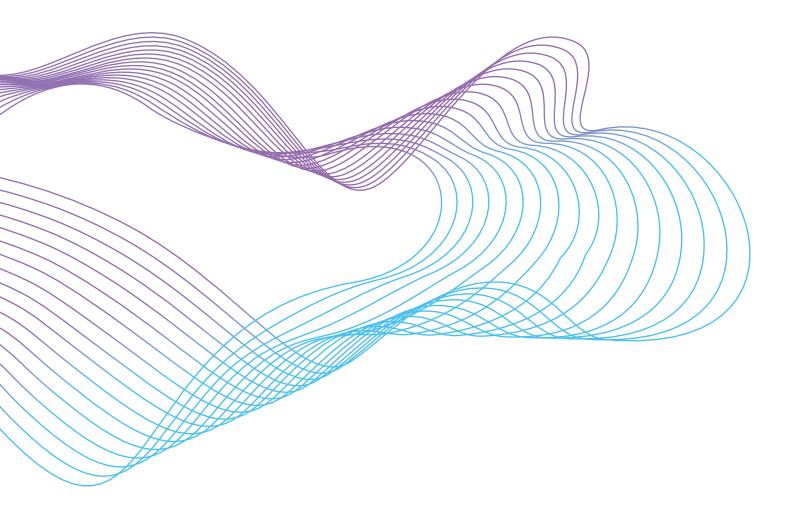
Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО Зав. РИО

Дизайн обложки

Вёрстка Подписано к печати 05.11.2024 Заказ № 4779 от 05.11.2024

Печатается в авторской редакции

Н.Ф. Гусарова отдел развития бренда Университета ИТМО К.Д. Бутылкина





Редакционно-издательский отдел Университета ИТМО

197101, Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49