



# СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ И ГОРОДСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Сборник материалов II Национальной (Всероссийской)  
научно–практической конференции

24–28 марта 2025 г.

*САНКТ–ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО–СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ, 2025*

Министерство науки и высшего образования  
Российской Федерации

Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ  
В ИНЖЕНЕРНЫХ СИСТЕМАХ  
И ГОРОДСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Сборник материалов II Национальной (Всероссийской)  
научно-практической конференции

24–28 марта 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

УДК 62

*Рецензенты:*

канд. техн. наук, доцент, завкафедрой гидротехнических сооружений, конструкций и гидравлики *К. П. Моргунов* (Государственный университет морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова);

канд. техн. наук, доцент, завкафедрой «Водоснабжение, водоотведение и гидравлика» *Н. В. Твардовская* (Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I)

**Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве** : сборник материалов II Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции [24–28 марта 2025 г.] ; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб. : СПбГАСУ, 2025. 341 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-9227-1443-3

Представлены статьи участников II Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции «Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве» (СТИСГХ-2025), проходившей в Санкт-Петербургском государственном архитектурно-строительном университете в 2025 году.

Сделан обзор современных достижений и представлены результаты, полученные в области водопользования и экологии; геодезии, землеустройства и кадастров; информационных технологий и математического моделирования; строительной физики, электроэнергетики и электротехники; теплогазоснабжения и вентиляции; математики в университете и других организациях.

*Печатается по решению Научно-технического совета СПбГАСУ*

*Редакционная коллегия:*

д-р техн. наук, доцент *Д. В. Ульрих* (председатель),

канд. техн. наук *Я. А. Волкова*,

канд. пед. наук, доцент *Я. Г. Кирк*,

канд. техн. наук, доцент *Е. В. Куц*,

канд. физ.-мат. наук, доцент *Л. В. Мовсесова*,

канд. пед. наук *Л. В. Грамбовская*,

канд. техн. наук, доцент *С. В. Федоров*,

канд. экон. наук, доцент *О. Н. Яркова*,

д-р техн. наук, профессор *Н. А. Черников*

Ответственный секретарь:

д-р техн. наук, доцент *А. М. Наместников*

ISBN 978-5-9227-1443-3

© Авторы, 2025

© Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2025

## **Секция «Водопользование и экология»**

УДК 725.74

*Роман Александрович Гурдин,*  
аспирант  
*Лада Евгеньевна Сушкова,*  
бакалавр  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*E-mail: 22002050@edu.spbgasu.ru,*  
*Sushkova.lada22@mail.ru*

*Roman Alexandrovich Gurdin,*  
postgraduate student  
*Lada Evgenievna Sushkova,*  
Bachelor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*E-mail: 22002050@edu.spbgasu.ru,*  
*Sushkova.lada22@mail.ru*

### **ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИСКУССТВЕННОГО ИНТЕЛЛЕКТА В СИСТЕМАХ БЕЗОПАСНОСТИ ПЛАВАТЕЛЬНЫХ БАССЕЙНОВ**

#### **PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN SWIMMING POOL SAFETY SYSTEMS**

Системы безопасности бассейнов, соответствующие требованиям ГОСТ Р 59219-2020, имеют ряд существенных недостатков, которые снижают их эффективность и надежность. Стандарт не содержит требований к прозрачности воды, устойчивости оборудования к химическим веществам, гидродинамических факторов, а также к регламентам технического обслуживания и обучению персонала. Это приводит к увеличению количества ложных срабатываний и снижению точности обнаружения опасных ситуаций. Внедрение искусственного интеллекта на основе машинного обучения и компьютерного зрения может повысить точность обнаружения несчастных случаев в бассейне, снизить количество ложных срабатываний и адаптировать систему к изменяющимся условиям. Анализ биометрических данных пловцов, правление параметрами системы и оптимизация взаимодействия с операторами обеспечивают более высокий уровень безопасности. Модернизация ГОСТ Р 59219-2020 с учетом современных достижений в области искусственного интеллекта позволит существенно улучшить процесс наблюдения за пловцами и снизить риск возникновения несчастных случаев.

*Ключевые слова:* искусственный интеллект, бассейн, безопасность, машинное обучение, компьютерное зрение.

Swimming pool safety systems that meet the requirements of GOST R 59219-2020 have a number of significant drawbacks that reduce their effectiveness and reliability. The standard does not contain requirements for water transparency, chemical resistance of equipment, hydrodynamic factors, as well as for maintenance regulations and personnel training. This leads to an increase in the number of false alarms and a decrease in the accuracy of detecting dangerous situations. The introduction of artificial intelligence based on machine learning and computer vision can improve the accuracy of detecting accidents in the pool, reduce the number of false alarms and adapt the system to changing conditions. The analysis of swimmers' biometric data, the management of system parameters and the optimization of interaction with operators ensure a higher level of security. The modernization of GOST R 59219-2020, taking into account modern achievements in the field of artificial intelligence, will significantly improve the process of observing swimmers and reduce the risk of accidents.

*Keywords:* artificial intelligence, swimming pool, safety, machine learning, computer vision.

Обеспечение безопасности посетителей бассейна – одна из главных задач его владельцев. К числу наиболее распространенных несчастных случаев, связанных с бассейнами, относятся утопления, травмы и отравления парами химических реагентов. Ежегодно в результате утоплений погибает около 235 000 человек [1]. Более половины (57 %) всех случаев гибели в воде приходится на детей и молодых людей в возрасте от 0 до 29 лет [2].

Современные технологии позволяют снизить риск утопления благодаря использованию автоматизированных систем мониторинга. Например, система Angel Eye, оснащенная подводными камерами, установленными по периметру бассейна, позволяет следить за движениями пловцов [3]. Искусственный интеллект, встроенный в эту систему, анализирует изображения в режиме реального времени и способен за 15 секунд распознать признаки утопления [3]. В случае обнаружения опасности, система незамедлительно сигнализирует спасателям. Еще одна эффективная система, Blue Fox, использует браслеты с датчиками, которые отслеживают положение тела пловца под водой [4].

Если человек задерживается под водой дольше безопасного времени или теряет активность, браслет автоматически отправляет сигнал тревоги на пост спасателей. Каждый браслет программируется с уче-

том индивидуальных условий, таких как глубина погружения и время нахождения под водой, при которых будет срабатывать тревога.

Технические решения должны быть дополнены организационными мерами. В частности, необходимо назначить дежурных спасателей, вести журнал контроля количества посетителей бассейна, четко обозначить глубину бассейна и зоны для разных возрастных групп, а также провести обучение посетителей правилам безопасности.

Требования к системам оповещения о возможной опасности утопления в бассейнах изложены в документе ГОСТ Р 59219-2020 [5]. В этом стандарте описаны основные требования к устройствам, предназначенным для оповещения об угрозе утопления. Однако при внимательном рассмотрении можно обнаружить некоторые недостатки и пробелы, которые могут повлиять на его практическое применение.

В ГОСТе отсутствуют требования к оптической прозрачности воды, однако она непосредственно влияет на эффективность работы подводных видеосистем. Высокая мутность, которая может быть вызвана недостаточной фильтрацией или повышенным содержанием органических веществ, способна привести к ложным срабатываниям, невозможности зафиксировать человека на дне или необходимости частой калибровки оборудования, что, в свою очередь, увеличивает эксплуатационные расходы.

Для улучшения ситуации можно рассмотреть возможность включения в стандарт требований к максимально допустимому уровню мутности воды (например,  $\leq 0,5$  мг/дм<sup>3</sup> по взвешенным веществам), что будет соответствовать нормам, установленным для питьевой воды.

В некоторых бассейнах для обеззараживания воды применяются такие методы, как озонирование, ультрафиолетовое излучение и хлорирование. Однако в ГОСТ не содержится информации о следующих аспектах:

1. Воздействие хлорсодержащих соединений на камеры и ультразвуковые датчики.
2. Риск коррозии элементов системы при повышенной влажности и воздействии агрессивных химических веществ.
3. Функционирование оборудования при колебаниях pH воды в диапазоне от 6,8 до 7,6.

Рекомендуется дополнить ГОСТ разделом, содержащим испытания на устойчивость систем обнаружения утепления к воздействию хлорсодержащих реагентов и озона.

Стандарт, определяющий размещение видеокамер и датчиков, не учитывает влияние движения воды на эффективность их функционирования. В бассейнах с активной циркуляцией воды, таких как гидромассажные системы, противотоки и водопады, возникают проблемы, связанные с движением воды. Во-первых, могут возникать завихрения, которые искажают изображение, получаемое с видеокамер. Во-вторых, образуются воздушные пузырьки, которые могут мешать работе ультразвуковых датчиков. Для улучшения ситуации необходимо внести изменения в параметры циркуляции воды, чтобы обеспечить стабильные условия работы сенсоров.

В стандарте, регламентирующем технические аспекты, отсутствуют четкие указания относительно периодичности проведения калибровки оборудования, а также требования к уровню подготовки персонала, обслуживающего системы безопасности. Кроме того, не определены алгоритмы взаимодействия спасателей с автоматическими системами, включая автоматическую передачу данных о чрезвычайных ситуациях. Для оптимизации ситуации предлагается внести требования к обучению операторов и разработать регламент обслуживания систем.

Системы обнаружения утепления могут ошибочно срабатывать в ответ на различные факторы, такие как игра детей под водой, волны от прыжков, плавающие предметы. ГОСТ не регламентирует количество допустимых ложных срабатываний в сутки, что может снизить доверие к системе. Для повышения эффективности работы системы можно установить допустимый уровень ложных срабатываний, например, не более пяти в сутки.

Современные технологии искусственного интеллекта (ИИ) представляют собой перспективное направление в области совершенствования автоматизированных систем безопасности для бассейнов. Алгоритмы машинного обучения и нейросетевые модели способны значительно повысить эффективность и надежность таких систем. Они позволяют минимизировать количество ложных срабатываний, адаптироваться к изменяющимся условиям эксплуатации и точно выявлять потенциальные угрозы.

Компьютерное зрение, объединенное с методами машинного обучения, позволяет значительно улучшить точность анализа видеопотока, минимизируя влияние таких факторов, как прозрачность воды, уровень освещения и наличие посторонних объектов. Одним из ключевых инструментов является использование сверточных нейронных сетей (CNN), которые распознают характерные движения [6], связанные с утоплением, отделяя их от безопасных действий, таких как ныряние, детская игра и волны от прыжков. Кроме того, адаптивные модели могут отслеживать изменение положения тела пловца в реальном времени, предсказывая вероятность несчастного случая еще до его фактического наступления.

Внедрение устройств, оснащенных датчиками, которые анализируют физиологические параметры пловца, повышает вероятность обнаружения критических ситуаций. Применение алгоритмов искусственного интеллекта для обработки данных, получаемых с акселерометров, датчиков частоты сердечных сокращений и уровня кислорода в крови, позволяет своевременно выявлять случаи потери сознания или переутомления, что снижает риск утопления. Интеграция этих данных с показаниями видеосистем создает комплексную модель оценки состояния пловца, обеспечивая более высокий уровень безопасности.

Интеллектуальные системы способны постоянно адаптироваться к меняющимся условиям в бассейне. Они учитывают такие факторы, как уровень освещенности, химический состав воды и циркуляцию воды. Благодаря этому системы обнаружения утопления становятся более устойчивыми к внешним воздействиям и обеспечивают стабильную работу даже в сложных гидродинамических условиях.

Интеграция искусственного интеллекта в системы безопасности бассейнов предполагает не только совершенствование методов распознавания угроз, но и разработку алгоритмов взаимодействия с операторами и спасателями. Автоматизированные системы должны обеспечивать многоуровневую сигнализацию, ранжируя степень угрозы и передавая соответствующую информацию в удобном формате. Например, интеллектуальные системы могут классифицировать сигналы по категориям риска и автоматически формировать рекомендации по реагированию.

Внедрение искусственного интеллекта в системы безопасности плавательных бассейнов представляет собой перспективное направление, способное значительно повысить точность обнаружения потенциально опасных ситуаций и снизить количество ложных срабатываний. Применение технологий машинного обучения, компьютерного зрения и анализа биометрических данных открывает перспективы создания комплексных интеллектуальных решений, способных адаптироваться к изменяющимся условиям и обеспечивать высокий уровень безопасности. Дальнейшее совершенствование ГОСТ Р 59219-2020 с учетом внедрения ИИ-технологий позволит разработать более надежные и эффективные системы мониторинга, способствующие снижению рисков несчастных случаев в плавательных бассейнах.

### Литература

1. Ускорение действий по предотвращению утоплений во всем мире // Всемирная организация здравоохранения. 30 января 2023 г. URL: [https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf\\_files/EB152/B152\\_CONF2-ru.pdf](https://apps.who.int/gb/ebwha/pdf_files/EB152/B152_CONF2-ru.pdf) (дата обращения 26.02.2025).
2. Утопления // Всемирная организация здравоохранения. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/drowning> (дата обращения 26.02.2025).
3. Электронный ресурс. URL: <https://www.angeleye.tech/en/> (дата обращения 27.02.2025).
4. Электронный ресурс. URL: <https://bas.ru/catalog/dop-oborudovanie/sistemi-bezopasnosti/blue-fox-chastnyh-basejnov/> (дата обращения 28.02.2025).
5. Национальный стандарт РФ ГОСТ Р 59219-2020 «Бассейны для плавания. Системы оповещения опасности утопления. Общие технические условия» (утв. и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 30 ноября 2020 г. № 1197-ст). Развернуть Swimming pools. Drowning warning system. General specifications ОКС 97.220.10. Дата введения – 1 мая 2021 г.
6. *Скрипачев В. О., Гуйда М. В., Гуйда Н. В., Жуков А. О.* Особенности работы сверточных нейронных сетей // International Journal of Open Information Technologies. 2022. № 12. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-raboty-svertochnyh-neyronnyh-setey> (дата обращения: 05.03.2025).

УДК 504.75:504.45.058

*Екатерина Сергеевна Терещенко,*  
студент

*Светлана Витальевна Макарова,*  
канд. биол. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*E-mail: s.v.makarius@mail.ru*

*Ekaterina Sergeevna Tereshchenko,*  
student

*Svetlana Vitalievna Makarova,*  
PhD in Sci. Biol., Associate Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*E-mail: s.v.makarius@mail.ru*

## **ПРОБЛЕМЫ РЕКРЕАЦИОННОГО ВОДОПОЛЬЗОВАНИЯ В САНКТ-ПЕТЕРБУРГЕ**

### **PROBLEMS OF RECREATIONAL WATER USE IN SAINT PETERSBURG**

Основными проблемами рекреационных водоемов Санкт-Петербурга являются несоответствие качества воды требованиям санитарного законодательства и «цветение» воды цианобактериями, являющееся следствием антропогенного эвтрофирования. В настоящее время в городе функционируют 24 организованных пляжа на 9 водных объектах. Большая часть из них расположена на северном побережье восточной части Финского залива. «Цветение» воды на этой акватории возникает регулярно. В июле-августе 2015-2024 гг. наблюдалось массовое развитие токсигенных видов *Microcystis aeruginosa*, *Dolichospermum lemmermannii*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Planktothrix agardhii*.

Согласно литературным данным, во время «цветения» воды в прибрежье Финского залива, оз. Сестрорецкий Разлив и оз. Нижнее Суздальское фиксировались концентрации цианотоксинов, опасные для здоровья отдыхающих. Однако этой проблеме со стороны санитарных служб достаточного внимания не уделяется. Кроме того, уровень знаний населения о причинах «цветения» воды и его влиянии на здоровье человека крайне низок. Поэтому для обеспечения экологической безопасности и повышения санитарной грамотности жителей необходимо размещать информацию на пляжах, Экологическом портале Санкт-Петербурга, сайте Роспотребнадзора, использовать местные телевизионные каналы. Просветительская деятельность является весьма актуальной, поскольку проблема токсичных цветений воды будет усугубляться в связи с изменением климата и активным освоением прибрежных территорий.

*Ключевые слова:* рекреационное водопользование, «цветение воды», цианобактерии, токсичность, просветительская деятельность.

The main problems of recreational water bodies in Saint Petersburg are the non-compliance of water quality with sanitary legislation requirements and toxic cyanobacterial water bloom which is a consequence of anthropogenic eutrophication. Currently, the city has 24 organized beaches on 9 water bodies. Most of them are located on the northern coast of the Eastern part of the Gulf of Finland. Water bloom in this water area occurs regularly. In July-August 2015–2024, mass vegetation of toxigenic species *Microcystis aeruginosa*, *Dolichospermum lemmermannii*, *Aphanizomenon flos-aquae*, *Planktothrix agardhii* was observed.

According to literature, during the period of water bloom the quantitative level of cyanotoxins in the coastal area of the Gulf of Finland, Lake Sestroretsky Razliv and Lake Nizhneye Suzdalskoye poses a threat to the health of the people. However, this problem is not given sufficient attention. In addition, the level of knowledge of the population about the causes of water bloom and its impact on human health is extremely low. Therefore, to ensure environmental safety and improve the sanitary literacy of residents, it is necessary to post information on the beaches, the Environmental Portal of St. Petersburg, the Rospotrebnadzor website and use local television channels. Educational activities are very important, since the problem of toxic water blooms will worsen due to climate change and active development of coastal areas.

*Keywords:* recreational water use, water bloom, cyanobacteria, toxicity, educational activities.

Рекреационное использование водных объектов, входящих в современные границы Санкт-Петербурга, имеет более чем столетнюю историю. Северное побережье восточной части Финского залива стало активно осваиваться петербургскими дачниками с конца XIX в., когда в 1870 г. была построена Финляндская железная дорога, соединившая Петербург и Гельсингфорс (Хельсинки). В 1898 г. было принято решение о строительстве под Сестрорецком бальнеологического курорта, торжественное открытие которого состоялось в июне 1900 г. Санаторий «Сестрорецкий Курорт» славится собственными минеральными водами кембрийского горизонта, лечебными грязями и уникальным микроклиматом. В этот же период дачная местность формировалась вокруг Суздальских озер.

В советское время на северном побережье Финского залива активно строились санаторно-курортные и детские оздоровительные учреждения. С начала 2000-х годов курортная зона интенсивно застраивается гостиницами, коттеджными поселками, апартаментами.

В последние годы в связи с развитием внутреннего туризма значение пляжного отдыха на побережье залива неуклонно возрастает.

Кроме того, принято решение о создании крупного туристического кластера с различными объектами рекреационного назначения на ст. Горская (северный берег Невской губы). Следовательно, вопросам рекреационного водопользования необходимо уделять повышенное внимание.

Существует две основные проблемы, характерные для рекреационных водных объектов, как в Санкт-Петербурге, так и в других регионах – это несоответствие качества воды требованиям санитарного законодательства и «цветение» воды цианобактериями, являющееся следствием антропогенного эвтрофирования.

Антропогенное эвтрофирование связано с поступлением в водоемы избыточного количества биогенных элементов (фосфора и азота) с неочищенными / недостаточно очищенными коммунально-бытовыми сточными водами или с поверхностным стоком с сельскохозяйственных территорий. Эвтрофированию способствуют гидрологические особенности водного объекта – низкая проточность, наличие застойных зон, мелководность, замкнутые (циркуляционные течения) и др.

Цианобактерии (синезеленые водоросли), вызывающие «цветение» – фотосинтезирующие микроорганизмы, в массе развивающиеся в летне-осенний период как пресных, так и солоноватых эвтрофных водах. Одной из характерных особенностей многих видов цианобактерий является их способность продуцировать специфические токсины (цианотоксины), представляющие опасность для организма человека и теплокровных животных. К началу 1990-х годов были накоплены обширные данные о негативных последствиях воздействия цианотоксинов на живые организмы. Описаны многочисленные случаи интоксикации и гибели домашних животных (коровы, утки, собаки), в том числе и на побережье Финского залива. У людей после купания в «цветущей» воде появлялись симптомы гастроэнтерита при случайном заглатывании клеток цианобактерий, раздражение слизистых оболочек глаз и носоглотки, дерматиты, аллергические реакции [1, 2]. Использование питьевой воды из цветущих водоемов вызывало развитие гепатоэнтерита, кровоизлияния в тканях печени, внутренние кровотечения, возникновение первичного рака печени и др. [3].

Во многих странах токсичное «цветение» водоемов рассматривается как серьезная экологическая проблема, угрожающая здоровью

нации, поэтому активно ведутся научные исследования в области токсикологии цианобактерий, осуществляется контроль цианотоксинов на водопроводных станциях и в рекреационных зонах, организуется мониторинг «цветения» воды, ведется просветительская работа. В нашей стране этой проблеме внимания уделяется явно недостаточно.

В настоящее время на территории Санкт-Петербурга функционируют 24 организованных пляжа (Табл. 1), находящихся под контролем Роспотребнадзора [4]. Большая часть из них расположена на северном побережье Финского залива (11 пляжей) и оз. Сестрорецкий Разлив (5 пляжей).

Санитарная обстановка в водных акваториях рекреационных зон Санкт-Петербурга контролируется Роспотребнадзором с мая по сентябрь в рамках еженедельного мониторинга по санитарно-химическим, микробиологическим и паразитологическим показателям. Так, в 2024 г. было отобрано 336 проб воды, и при этом на всех пляжах ее качество не соответствовало санитарным требованиям [4]; подобная ситуация повторяется ежегодно. Купание в таких водоемах и случайное заглатывание воды может приводить к заражению острыми кишечными инфекциями, вирусным гепатитом А, энтеровирусным инфекциями, паразитарными заболеваниями. Полученная информация доводится до сведения населения через средства массовой информации и сайт Роспотребнадзора.

Таблица 1

### Пляжи Санкт-Петербурга

№ п/п	Водный объект	Количество пляжей	Район
1.	Финский залив	9	Курортный
		1	Приморский
		1	Кронштадтский
2.	оз. Сестрорецкий Разлив	5	Курортный

Окончание табл. 1

№ п/п	Водный объект	Количество пляжей	Район
3.	оз. 1-е Суздальское (Верхнее)	1	Приморский
4.	оз. 2-е Суздальское (Среднее)	1	
5.	оз. 3-е Суздальское (Нижнее)	1	
6.	Ольгинский пруд	1	
7.	оз. Безымянное	1	Красносельский
8.	Колонистский пруд	1	Пушкинский
9.	р. Ижора	2	Колпинский

Вторая проблема – «цветение» воды цианобактериями (синезелеными водорослями) остается без должного внимания и санитарными службами не контролируется. В Российской Федерации отсутствуют нормативные значения концентраций цианотоксинов в питьевых и рекреационных водах. Нормативы, принятые Всемирной организацией здравоохранения [5, 6] также не действуют.

«Цветение» воды у северного курортного побережья Финского залива отмечается регулярно. Максимум развития цианобактерий обычно наблюдается на этой акватории в июле-августе при максимальных температурах воды, т. е. в разгар купального сезона. При благоприятных гидрометеорологических условиях поверхностное цветение воды может возникать и в сентябре.

Видовой состав цианобактерий в пробах фитопланктона, отобранных в прибрежной зоне г. Зеленогорска (пляж Золотой) в июле–августе 2015–2024 гг. приведен в таблице 2. По данным наших наблюдений

основу биомассы фитопланктона в периоды «цветения» воды составляли потенциально токсичные виды, способные к выработке гепатотоксина и нейротоксинов. Это может представлять опасность для отдыхающих, однако медицинская статистика по данной проблеме отсутствует.

Таблица 2

### Доминирующие виды цианобактерий

Год	Виды
2015	<i>Microcystis aeruginosa</i> , <i>Dolichospermum lemmermannii</i> , <i>Aphanizomenon flos-aquae</i>
2016	<i>D. lemmermannii</i> , <i>M. aeruginosa</i> , <i>A. flos-aquae</i> , <i>Planktothrix agardhii</i> , <i>Limnothrix planctonica</i>
2017	<i>M. aeruginosa</i> , <i>A. flos-aquae</i>
2018	<i>M. aeruginosa</i> , <i>D. lemmermannii</i>
2020	<i>P. agardhii</i> , <i>L. planctonica</i>
2024	<i>M. aeruginosa</i>

Исследования токсичности цианобактерий в восточной части Финского залива, оз. Сестрорецкий Разлив и оз. Нижнее Суздальское, согласно литературным данным, проводились в 2010–2018 гг. [7, 8]. Как в воде озер, так и в биомассе фитопланктона были зарегистрированы гепатотоксины (20 структурных вариантов микроцистинов), включая наиболее опасный микроцистин-LR, и анабенопептины. Продуцентами этих цианотоксинов являлся один из доминирующих видов фитопланктона *Microcystis aeruginosa*. В обоих водоемах также отмечено присутствие нейротоксина (анатоксин-а), который синтезируют *Aphanizomenon flos-aquae* и *Planktothrix agardhii*. Сходная картина наблюдалась и в прибрежных водах Финского залива (пляжи пос. Репино и г. Зеленогорска), где также в периоды цветения воды отмечено присутствие микроцистинов (6–11 форм) и анатоксина-а. В составе фитопланктона доминировали указанные выше виды. Было показано, что количественный уровень цианотоксинов в рекреационных зонах исследованных водоемов представляет угрозу для здоровья населения [8].

Токсичные цветения воды в восточной части Финского залива отмечались не только в прибрежной, но и в открытой части мелководного района. Анализ биомассы *M.aeruginosa* показал присутствие микроцистинов-LR, а также биотоксинов [9].

Существует еще одна проблема – низкий уровень знаний населения о причинах эвтрофирования и влиянии «цветения» воды на состояние водной экосистемы и здоровье человека. Как правило, цветение воспринимается как естественное природное явление, создающее лишь временные неудобства. Большинство отдыхающих не готовы отказываться от купания в цветущей воде.

В тех странах, где к проблеме «цветения» водоемов относятся серьезно, большое внимание уделяется просвещению и информированию населения различными доступными способами: на пляжах размещается наглядная информация об опасности, связанной с развитием цианобактерий, используются электронные ресурсы санитарных и экологических служб, издается научно-популярная литература и т. д.

В целях обеспечения санитарного благополучия и повышения экологической грамотности населения в Санкт-Петербурге также необходимо уделять внимание просветительской деятельности, которую могут осуществлять Роспотребнадзор и Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности (в том числе, через Экологический портал и размещение информации на пляжах). Это является актуальной задачей, поскольку проблема токсичных цветений воды в курортной зоне Финского залива и других водных объектах города будет, по всей видимости, усугубляться, как в связи с изменением климата, так и в результате активного освоения прибрежных территорий.

### Литература

1. *Sivonen K.* Toxic Cyanobacteria in Finnish fresh waters and the Baltic Sea // Reports from Dept. Microbiol. Univ. Helsinki, 1990. V. 39. P. 1–87.
2. *Lahti K.* Cyanobacterial hepatotoxins and drinking water supplies – aspects of monitoring and potential health risks // Monographs of the Boreal Environmental Research. 1997. № 4. 40 pp.
3. *Carmichael W. W.* The toxins of Cyanobacteria // Scient.Amer. 1994. P. 78–86.
4. О состоянии водных акваторий пляжей на 03.09.2024 года URL: <https://www.78.rospotrebnadzor.ru/press-tsentr/novosti/12862/> (Дата обращения 07.03.2025).

5. Guidelines for Drinking Water Quality. World Health Organization. WHO, 2017. 541 pp.

6. Toxic Cyanobacteria in water. WHO, 2021. 859 pp.

7. Чернова Е. Н., Русских Я. В., Воякина Е. Ю., Жаковская З. А. Исследования природных экотоксикантов - метаболитов синезеленых водорослей в разнотипных озерах Северо-запада России Региональная экология, 2014, № 1-2(35). С. 77–84.

8. Воякина Е. Ю., Русских Я. В., Чернова Е. Н., Жаковская З. А. Токсичные цианобактерии и их метаболиты в водоемах Северо-Запада России // Популяционная экология. 2020. № 1, с. 124–129. Doi:10/25750/1995-4301-2020-1-124-129].

9. Волошко Л. Н, Сафронова Т. В. Цианобактериальные «цветения» в Финском заливе Балтийского моря // Астраханский вестник экологического образования. № 2(32). 2015. С. 65–73.

**УДК 626.81:504.052**

*Дмитрий Леонидович Устюгов,*  
канд. геол.-минерал. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II)  
*Ноа Сегура Эктор Луис,*  
магистр, аспирант  
(Санкт-Петербургский горный университет  
императрицы Екатерины II),  
(Сьего-де-Авила университет Максимо  
Гомес Базе)  
*Мила Дома Юлиеми де ла Каридад,*  
специалист  
(Институт геологии и палеонтологии  
Геологической службы Республики Кубы)  
*E-mail: Ustyugov\_DL@pers.spmi.ru,*  
*s233146@smud.spmi.ru,*  
*hectorlns@unica.cu,*  
*yuliemi@igp.minem.cu*

*Dmitrii Leonidovich Ustyugov,*  
PhD in Sci. Geol.-mineral., Associate Professor  
(Empress Catherine II Saint Petersburg  
Mining University)  
*Noa Segura Hector Luis,*  
Master's degree, postgraduate student  
(Empress Catherine II Saint Petersburg  
Mining University),  
(University of Ciego de Avila Maximo  
Gomez Baez),  
*Milá Doma Yuliemi de la Caridad,*  
specialist  
(Institute of Geology and Paleontology  
Geological Survey of the Republic of Cuba),  
*E-mail: Ustyugov\_DL@pers.spmi.ru,*  
*s233146@smud.spmi.ru,*  
*hectorlns@unica.cu,*  
*yuliemi@igp.minem.cu*

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ  
ФОРМИРОВАНИЯ ГРУНТОВЫХ ВОД  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АЛГОРИТМОВ  
МАШИННОГО ОБУЧЕНИЯ В СЕВЕРНОМ  
ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОМ БАССЕЙНЕ  
(СЬЕГО-ДЕ-АВИЛА, РЕСПУБЛИКА КУБА)**

**DETERMINATION OF GROUNDWATER FORMATION  
PATTERNS USING MACHINE LEARNING ALGORITHMS  
IN THE NORTHERN HYDROGEOLOGICAL BASIN  
(CIEGO DE AVILA, REPUBLIC OF CUBA)**

Прогнозирование уровня грунтовых вод на севере города Сьего-де-Авила, Республика Куба, было выполнено с помощью алгоритма Histogram Gradient Boosting Regressor. Иерархический классификационный анализ климатических данных позволил сократить число предикторных переменных – атмосферных осадков и эвапотранспирации (с 10498 до 56). Осадки являются основным источником пополнения подземных вод, а эвапотранспирация более изменчива, но негативно влияет на изменение уровня подземных вод. Временная

модель уровня грунтовых вод была смоделирована эффективно, с  $RSME = 0,25$  м и  $MAE = 0,10$  м. Однако некоторые скважины показали большую изменчивость, что требует дальнейшего анализа.

*Ключевые слова:* подземные воды, прогнозирование, HistGradientBoostingRegressor, Куба, гидрогеология.

Groundwater level prediction was performed in the north of Ciego de Avila, Republic of Cuba, with the Histogram Gradient Boosting Regressor algorithm. The hierarchical classification analysis of climatic data reduced the predictor variables of precipitation and evapotranspiration (from 10498 to 56). Precipitation is the main source of groundwater recharge and evapotranspiration is more variable but negatively influences groundwater level change. The temporal pattern of groundwater level was effectively modeled, with  $RSME = 0.25$  m and  $MAE = 0.10$  m. However, some wells showed large variability, which requires further analysis.

*Keywords:* groundwater, prediction, HistGradientBoostingRegressor, Cuba, hydrogeology.

Прогнозирование уровня подземных вод в водоносных горизонтах имеет жизненно важное значение для устойчивого управления водными ресурсами на Кубе, это позволяет планировать эксплуатацию водоносных горизонтов и их долгосрочное наличие, однако существуют неопределенности в точности этих прогнозов [2, 6, 7]. Поэтому целью данной работы является моделирование с помощью алгоритма автоматического обучения HistGradientBoostingRegressor, принимая во внимание его эффективное использование в последних исследованиях [1, 3, 5], функциональных связей между местными осадками и эвапотранспирацией со спутника MOD16A2GF.061 [4] и колебаниями уровня грунтовых вод в гидрогеологических единицах северного гидрогеологического бассейна Сьегоде-Авила, Республика Куба.

Исследования проводились в гидрогеологическом бассейне на севере Сьего-де-Авила, в центральном регионе Республики Куба (рис. 1, а). Взаимосвязь между переменными (рис. 1, б): уровнем грунтовых вод, осадками и эвапотранспирацией, изучалась по месячным записям 30 наблюдательных скважин, местным месячным осадкам и месячным записям эвапотранспирации по данным дистанционного зондирования Земля MOD16A2GF.061.

Коэффициент Спирмена (1) оценивался для предикторных характеристик (атмосферные осадки и эвапотранспирация) с целью выяв-

ления тех, которые имеют сходное монотонное поведение и сходство тренда, т. е. общие временные закономерности. Дендрограмма иерархической классификации (рис. 2) была построена по методу Уорда, что позволило сгруппировать климатические переменные по их временным закономерностям и свести базу данных к наиболее представительным характеристикам набора данных.

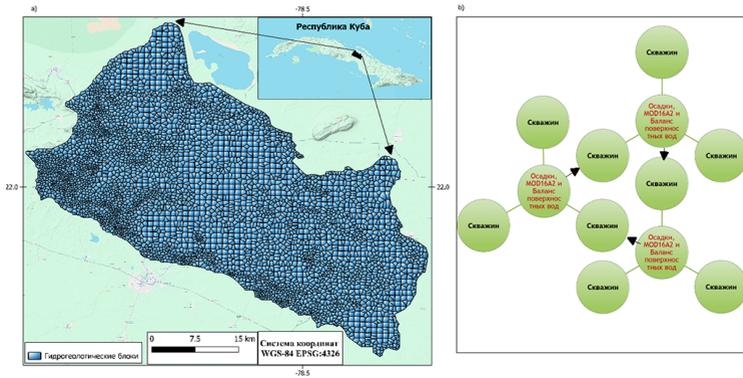


Рис. 1. Моделирование схем: *а* – схема гидрогеологических блоков; *б* – схема обучения и прогнозирования данных

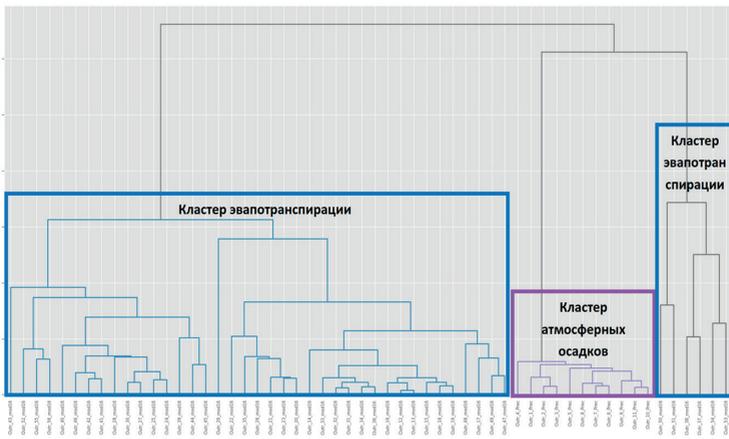


Рис. 2. Иерархическая дендограмма определенных кластеров

$$\rho = 1 - \frac{6 \sum D^2}{N(N^2 - 1)} \quad (1)$$

где  $D$  – разница между соответствующими статистиками порядка  $x - y$ .  $N$  – количество пар данных.

Прогнозирование уровня грунтовых вод осуществлялось в процессе обучения (рис. 1, б и рис. 3) алгоритма *Histogram Gradient Boosting Trees* бесплатной библиотеки *Scikit-learn* на языке *Python*. Качество процесса оценивалось с помощью корневой среднеквадратичной ошибки (RSME) и средней абсолютной ошибки (MAE).

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|}{n} \quad (2)$$

$$RSME = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (3)$$

где  $n$  – объем выборки,  $y_i$  – прогнозируемое значение,  $x_i$  – фактическое значение.

Анализ данных методом иерархической классификации (рис. 2) позволил сократить число исходных предикторных переменных с 10498 до 56, а также выделить зоны бассейна с пространственными закономерностями осадков и эвапотранспирации, согласно временным закономерностям (трендам) в рядах (рис. 3). Использование кластеров в качестве критерия пространственного зонирования позволило выявить, что эвапотранспирация (45 зон) является характеристикой с наибольшей пространственно-временной изменчивостью (рис. 3, б), в то время как осадки имеют 11 репрезентативных зон (рис. 3, а).

Результаты моделирования с помощью *Histogram Gradient Boosting Trees* на основе проведенного зонирования и за период (2000–2014 гг.) представлены на рисунке 4 серией графиков, отражающих моделирование уровня подземных вод в 30 наблюдательных скважинах. Каждый график разделен на два участка: первый представляет период обучения модели, второй – период прогнозирования (2014–2020 гг.). Видно, что модель отражает закономерности и тенденции уровня подземных вод как в период обучения, так и в период прогнозирования.

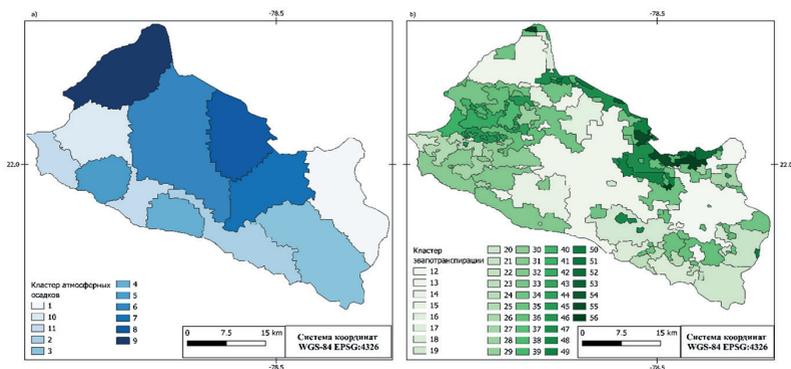


Рис. 3. Регионы с однородной структурой:  
 а – кластеры осадков; б – кластеры испарения.

В таблице представлены ошибки прогнозирования, в частности, ошибка RSME и ошибка MAE, для каждой наблюдательной скважины. В целом, значения RSME и MAE низкие, что указывает на хорошую работу модели при прогнозировании уровня грунтовых вод. Однако замечено, что некоторые скважины (например, 1657, 1666, 1740, 1834) имеют несколько большие ошибки, в случае скважины 6974 (недооценка) различия могут быть обусловлены большим влиянием сверхэксплуатационного сброса в неравновесии с подпиткой в зонах влияния скважины.

**Корневая среднеквадратичная ошибка (RSME) и средняя абсолютная ошибка (MAE) для каждой наблюдательной скважины**

СКВАЖИН	RSME	MAE	СКВАЖИН	RSME	MAE	СКВАЖИН	RSME	MAE
1086	0,11	0,04	1666	0,24	0,07	1981	0,17	0,05
11543	0,16	0,06	1702	0,19	0,08	1986	0,12	0,05
12024	0,03	0,02	1706	0,06	0,02	2026	0,12	0,05
1359	0,06	0,03	1740	0,24	0,1	3005	0,12	0,05
1371	0,06	0,03	1834	0,28	0,09	6974	3,97	1,39

Окончание таблицы

СКВАЖИН	RSME	MAE	СКВАЖИН	RSME	MAE	СКВАЖИН	RSME	MAE
1396	0,06	0,03	1836	0,07	0,03	L2M	0,08	0,04
1501	0,08	0,03	1847	0,11	0,05	L3M	0,21	0,12
1517	0,08	0,05	1871	0,08	0,04	L4M	0,09	0,04
1555	0,11	0,05	1874	0,12	0,07	L5M	0,08	0,04
1657	0,21	0,09	1974	0,09	0,04	L6M	0,07	0,03

Пространственно-временные закономерности климатических переменных: осадков и испарения, оказывают большое влияние на формирование подземных вод в гидрогеологическом бассейне на севере Сьего-де-Авила. Согласно проведенному анализу, осадки являются основным источником изменения повышения уровня грунтовых вод за счет подпитки, и они однородно распределены по 11 зонам, однако эвапотранспирация представляет большую изменчивость и иерархию (45 кластеров) в изменении уровня грунтовых вод, что может быть следствием интенсивного орошения грунтовыми водами. Использование алгоритма Histogram Gradient Boosting Trees дало положительные результаты, MAE составил 0,09 м, только в одной скважине он был выше, поэтому рекомендуется продолжать совершенствовать методологию анализа и моделирования гидрогеологических данных.

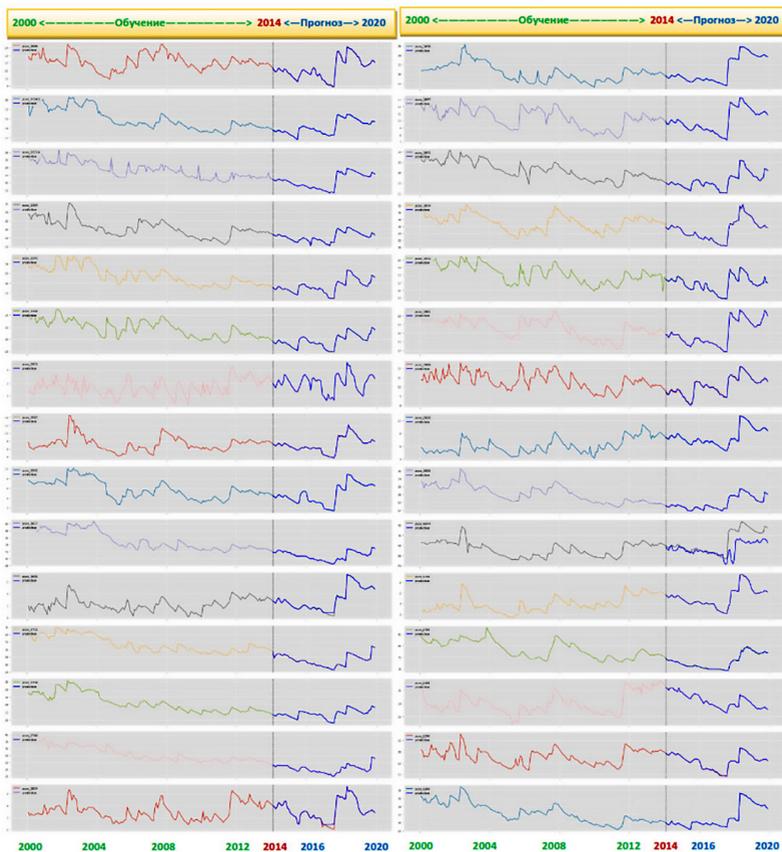


Рис. 4. Временной прогноз уровня грунтовых вод в наблюдательных скважинах

### Литература

1. *Madhushani C.* [и др.]. Modeling streamflow in non-gauged watersheds with sparse data considering physiographic, dynamic climate, and anthropogenic factors using explainable soft computing techniques // *Journal of Hydrology*. 2024. (631). С. 130846. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130846/>
2. *Molerio-León L. F.* Reingeniería geológica, hidrológica e hidráulica del cambio climático: situación y perspectivas // *Cub@: Medio Ambiente y Desarrollo*. 2022. № 42(22).

3. *Priyadarshini I.* [и др.]. Water pollution reduction for sustainable urban development using machine learning techniques // *Cities*. 2022. (130). С. 103970. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2022.103970/>
4. *Running S.* [и др.]. MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V061 // 2021. <https://doi.org/10.5067/MODIS/MOD16A2GF.061/>
5. *Shi Y., Li J., Li Z.* Gradient Boosting with Piece-Wise Linear Regression Trees 2019.С. 3432–3438. <https://doi.org/10.24963/ijcai.2019/476/>
6. *Ustyugov D. L., Noa H. L., Ryakhovsky M. S.* Influence of rainfall infiltration on groundwater recharge in hydrogeological region La Yana, Cuba // *Gornyi Zhurnal*. 2024. № 9. С. 97–102. <https://doi.org/10.17580/gzh.2024.09.15/>
7. *Vidal Olivera V. M., González-Abreu R.* Relación del régimen hídrico actual con algunos impactos ambientales en el gran humedal del norte de Ciego de Ávila. 2010.

**УДК 628.2**

*Лю Хао,*

студент

*Святослав Викторович Федоров,*

канд. техн. наук, доцент

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

*E-mail: 304329703@qq.com,*

*svyatoslavfedorov@mail.ru*

*Liu Hao,*

student

*Svyatoslav Viktorovich Fedorov,*

PhD in Sci. Tech., Associate Professor

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

*E-mail: 304329703@qq.com,*

*svyatoslavfedorov@mail.ru*

## **АНАЛИЗ И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫБРОСОВ СЕРОВОДОРОДА В КАНАЛИЗАЦИОННЫХ ПЕРЕПАДНЫХ ШАХТАХ РАЗЛИЧНОГО ТИПА**

### **ANALYSIS AND RESEARCH OF HYDROGEN SULFIDE EMISSIONS IN SEWAGE DROP MINES OF VARIOUS TYPES**

Шахта – это специальная конструкция, которая соединяет трубы, расположенные выше по течению, в городской дренажной системе. Когда вода падает, она генерирует огромную энергию, и генерируемая энергия вызовет определенную эрозию структуры рассеивания энергии. Более того, при протекании воды через эту конструкцию она придет в турбулентное состояние, в результате чего вредные газы, растворенные в воде, будут выделяться в воздух, что окажет определенное воздействие на окружающую среду. Также очень важны исследования, посвященные тому, как контролировать возможность устранения энергии и сокращения выбросов вредных газов. Поэтому в данной статье будет использовано программное обеспечение для анализа динамики жидкости ANSYS для моделирования и анализа работы шахт с поперечными решетками. Было смоделировано выделение сероводорода с разной скоростью и разной концентрацией сульфид-ионов. Результаты показывают, что коэффициент массопередачи шахт с поперечными решетками составляет от  $56,43 \times 10^{-7}$  м/с до  $83,37 \times 10^{-7}$  м/с, что дает ориентир для последующих исследований.

*Ключевые слова:* шахта, численное моделирование, ANSYS, массопередачи, шахта с поперечными решетками.

The shaft is a special structure that connects the upstream pipes in the urban drainage system. When the water falls, it generates enormous energy, and the generated energy will cause a certain erosion of the energy dissipation structure. Moreover, when the water flows through this structure, it will come into a turbulent

state, causing the harmful gases dissolved in the water to be released into the air, which will have a certain impact on the environment. Research on how to control the possibility of eliminating energy and reducing the emission of harmful gases is also very important. Therefore, this paper will use the fluid dynamics analysis software ANSYS to simulate and analyze the performance of the cross-grate shafts. The release of hydrogen sulfide with different speeds and different concentrations of sulfide ions was simulated. The results show that the mass transfer coefficient of the cross-grate shafts ranges from  $56.43 \times 10^{-7}$  m/s to  $83.37 \times 10^{-7}$  m/s, which provides a benchmark for future research.

*Keywords:* shaft, numerical simulation, ANSYS, mass transfer, shaft with transverse grates.

С быстрым развитием экономики ускоряется процесс урбанизации, увеличиваются масштабы городских канализационных дренажных систем. Централизованная очистка городских сточных вод требует огромной канализационной дренажной сети для сбора и транспортировки сточных вод, что заставляет маршруты городских канализационных дренажных труб продолжать удлиняться. Более длинные канализационные трубопроводы играют роль биохимических реакторов. По мере увеличения времени пребывания сточных вод в трубопроводе растворенный кислород и нитраты в сточных водах полностью расходуются, и в трубопроводе постепенно формируется анаэробная среда, в результате чего в микроорганизмах в сточных водах и осадке на дне трубы образуются токсичные и вредные газы, такие как сероводород [1, 2].

Сероводород обычно является продуктом некоторых химических реакций и естественного разложения белков. Как компонент некоторых природных веществ, он широко присутствует в различных производственных процессах и в природе. Например, сероводород образуется при переработке сульфидных руд, добыче угля и нефти. В городских системах сброса сточных вод нельзя игнорировать образование и распространение сульфидов. В анаэробных условиях сульфаты и органические сульфиды в сточных водах могут превращаться в сульфиды. Из-за своей летучести сульфид часто постоянно выбрасывается в виде сероводорода после сброса со сточными водами, образуя резкий запах. Сероводород является не только токсичным веществом с определенной степенью токсичности, но и типич-

ным источником запаха. Постоянный выброс сероводородного газа в трубопроводах вызывает коррозию трубопроводов и представляет определенную опасность для здоровья человека [3, 4].

В то же время шахта представляет собой конструкцию в дренажной системе, которая соединяет секции труб с большой высотой падения. Когда сточные воды, содержащие вредные газы, такие как сероводород, поступают в шахту, растворенный в воде сероводород будет выделяться в воздух из-за таких факторов, как конструкция шахты, pH и скорость потока воды, нанося вред окружающей среде и здоровью человека [5]. Поэтому в данной работе будет проведено имитационное исследование выбросов вредных газов, таких как сероводород, во время эксплуатации шахты.

На основе предыдущих исследований моделей многофазного потока было проведено имитационное исследование шахт с поперечными решетками с использованием многожидкостной модели. Для турбулентности жидкой фазы использовалось стандартное уравнение  $k-\epsilon$ , и для передачи импульса между двумя фазами учитывался только эффект сопротивления [6]. Результаты моделирования дают определенную теоретическую основу для изучения процесса выделения сероводорода в вертикальных стволах.

Рассмотрим шахты с поперечными решетками, уменьшенную в масштабе 1:60. Исходная шахта имеет диаметр 10 м и высоту 60 м. После масштабирования модель имеет диаметр 0,17 м и высоту 1 м (см. рис. 1). Были заданы различные скорости истечения: 0,05 м/с, 0,075 м/с, 0,1 м/с, а объемные доли сероводорода в момент притока были заданы равными 0,007, 0,015 и 0,029 соответственно, то есть соответствующие концентрации сульфид-ионов в водном растворе были равны 10 мг/л, 20 мг/л и 40 мг/л соответственно. Начальный временной шаг  $\Delta t = 0,1$  с, а общее время расчета составило 100 с.

Плотность сетки напрямую влияет на устойчивость сходимости и результаты расчетов. Если сетка слишком плотная, объем расчетов увеличится; если сетка слишком редкая, устойчивость сходимости уменьшится, а ошибка расчетов увеличится. Поэтому очень важно разумно определить плотность сетки. Для модели вблизи стенки и области, где состояние потока меняется более резко, плотность сетки должна быть соответствующим образом увеличена для повышения

точности расчетов [7]. Учитывая ограниченность компьютерных ресурсов и для того, чтобы соответствовать требованиям расчетов, диапазон размеров сетки составляет 0,05~0,20 м. Окончательный метод деления сетки шахты с поперечными решетками показан на рис. 2.

\*\*\*200808.08.080208

Ansys  
2008.02

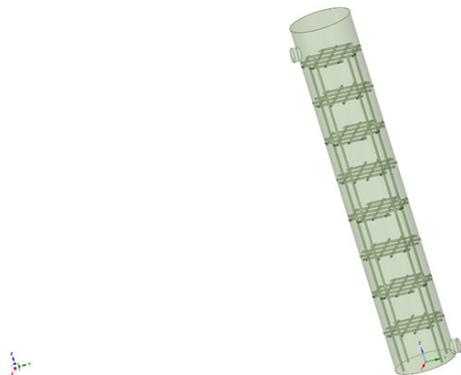


Рис. 1. Модель шахт с поперечными решетками

Когда вода поступает в шахту с определенной скоростью, при прохождении через решетку поток воды разделяется решетом, в результате чего поток воды оказывается в турбулентном состоянии. Турбулентный поток воды ускорит выделение растворенного в воде сероводорода. Поскольку горизонтальные прутья решета малы, возмущение газа потоком воды в основном направлено вниз, и только часть разделенного потока воды вызовет возмущение газа в боковом направлении, как показано на рис. 3. Поэтому по сравнению с другими структурными шахтами возмущение газа относительно невелико.

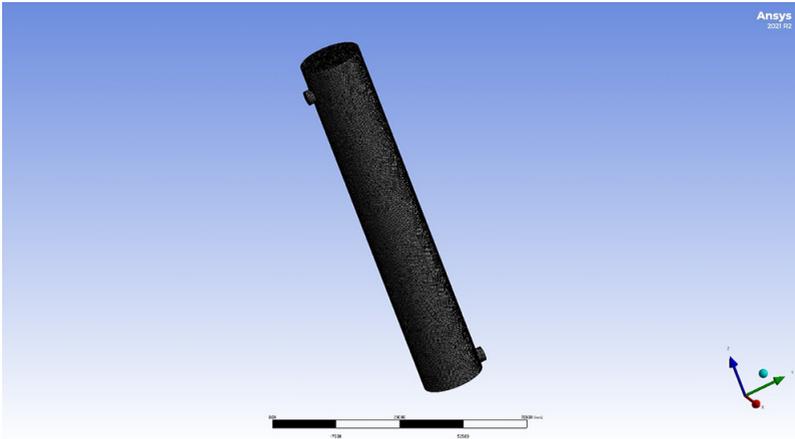


Рис. 2. Модельная сетка

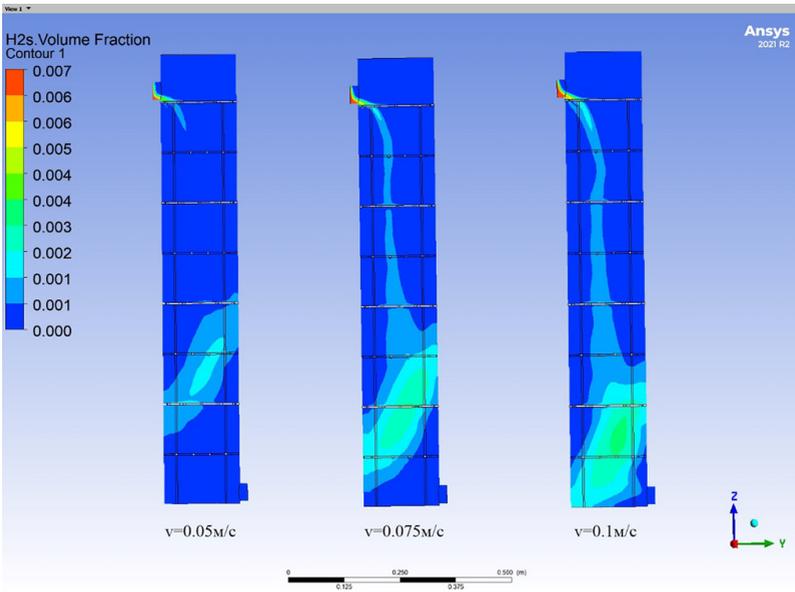


Рис. 3. Объемная доля сероводорода при различных скоростях в шахте

Из кривой объемной доли сероводорода (4) видно, что при концентрации ионов серы в сероводороде на входе 10 мг/л, 20 мг/л и 40 мг/л соответственно при скорости входа 0,05 м/с на рис. 4, а – объемная доля ионов серы в точке контроля составляет  $1,05 \times 10^{-3}\%$  –  $7,40 \times 10^{-3}\%$ ; при скорости входа 0,075 м/с на рис. 4, б – объемная доля ионов серы в точке контроля составляет  $2,13 \times 10^{-3}\%$  –  $8,95 \times 10^{-3}\%$ ; при скорости входа 0,1 м/с на рис. 4, в – объемная доля ионов серы в точке контроля составляет  $2,56 \times 10^{-3}\%$  –  $10,27 \times 10^{-3}\%$ .

Согласно графикам и анализу данных, с увеличением расхода и концентрации соответственно увеличивается и концентрация сероводородного газа, достигающего точки контроля. Таким образом, доказано, что при интенсивном движении потока воды, по мере увеличения концентрации ионов серы в воде, дегазирующий эффект потока воды также будет увеличиваться. По формуле было рассчитано, что коэффициент массопередачи сероводородного газа составляет от  $56,43 \times 10^{-7}$  м/с до  $83,37 \times 10^{-7}$  м/с.

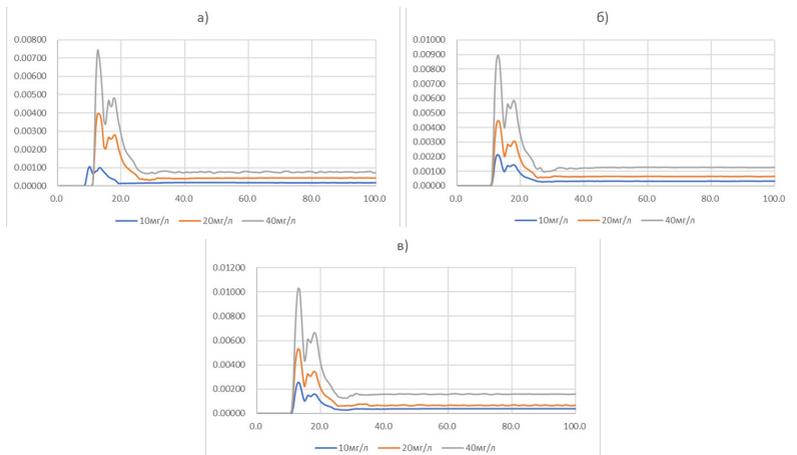


Рис. 4. Кривые объемной доли сероводорода при трех различных скоростях притока: а –  $V = 0,05$  м/с; б –  $V = 0,075$  м/с; в –  $V = 0,1$  м/с.

Наблюдения, проведенные в ходе имитационного эксперимента, а также экспериментальные данные позволили установить, что при

работе шахты с поперечными решетками по мере увеличения концентрации ионов серы в воде и увеличения скорости притока соответственно увеличивается и скорость выделения сероводорода в шахту. Поэтому при реальной эксплуатации шахты необходимо максимально снизить концентрацию сероводорода в потоке воды, а также уменьшить турбулентность потока воды для уменьшения выделения сероводорода. Это дает определенную основу для последующих экспериментов и реальных проектов.

### Литература

1. *Li Xiaoyu*. Research on urban vertical planning based on large drainage system construction [D]. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, 2020.
2. *Fan Bin*. Thoughts and misunderstandings on resource management and utilization of rural domestic sewage [J]. *China Water and Drainage*, 2024, 40(16): 1–7.
3. *Wang Guanghua, Zhou Jianhua, Li Wentao, et al.* Research on operation and maintenance of typical deep tunnel drainage system [J]. *Water and Drainage*, 2021, 57(05): 128–134.
4. *Bao Liang*. Development and application of combustible gas monitoring and early warning system for urban sewers and septic tanks [D]. Chongqing University, 2009.
5. *Fang Deqiong*. Research on detection and distribution law of harmful gases in mountainous urban sewage pipes [D]. Chongqing University, 2012.
6. *Nan Junhu, Gao Huan, Tao Ran, et al.* Research on suitability of mathematical model of water-gas two-phase flow characteristics in flood discharge shaft [J]. *Hydropower Energy Science*, 2022, 40(08): 122–126.
7. *Lu Sanqiang*. Numerical simulation study on water-gas two-phase flow characteristics and structural optimization in drop shaft [D]. Lanzhou University of Technology, 2023.

**УДК 628.6**

*Эллина Юрьевна Корниенко,*

студент

*Константин Валерьевич Светлицкий,*

студент

*Светлана Юрьевна Игнатчик,*

д-р техн. наук, профессор

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

*E-mail: e.kornienko19.03@mail.ru,*

*kostya\_svetlitskiy@mail.ru*

*Ellina Yurievna Korniyenko,*

student

*Konstantin Valeryevich Svetlitskiy,*

student

*Svetlana Yurievna Ignatchik,*

Dr. Sci. Tech., Professor

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

*E-mail: e.kornienko19.03@mail.ru,*

*kostya\_svetlitskiy@mail.ru*

**РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРЕДМЕТНО  
ОБЛАСТИ ПО ИЗМЕНЕНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКОЙ  
И МАССОВЫХ НАГРУЗОК НА ОЧИСТНЫЕ  
СООРУЖЕНИЯ ОБЩЕСПЛАВНЫХ СИСТЕМ  
ВОДООТВЕДЕНИЯ**

**RESULTS OF THE STUDY OF THE SUBJECT AREA  
ON CHANGES IN HYDRAULIC AND MASS LOADS  
ON THE TREATMENT FACILITIES OF THE GENERAL  
WASTEWATER DISPOSAL SYSTEM**

Городские сточные воды, содержащие широкий спектр загрязняющих веществ, таких как органические соединения, тяжелые металлы, нефтепродукты, лекарственные препараты и микроорганизмы, являются опасными и при недостаточной очистке или при ее отсутствии и могут привести к загрязнению водоемов, разрушению экосистем, гибели водных организмов. В условиях современного мира при быстром развитии и росте городов, промышленности и технологий сточные воды на очистные сооружения поступают неравномерно, что отрицательно сказывается на эффективности их очистки. Для того чтобы обосновывать мероприятия по смягчению последствий этих явлений необходимо исследовать степень неравномерности гидравлических и массовых нагрузок в системах водоотведения. В данной работе производится анализ материалов, изучающих режимов притока сточных вод и колебаний концентраций загрязняющих веществ в различные периоды. Нестационарность притока сточных вод во время штормовых явлений определяется изменениями расходов бытовых сточных вод по часам суток и периодам года, а также поступлением дождевых вод.

*Ключевые слова:* сточные воды, очистные сооружения, загрязняющие вещества, часовой расход, месячный расход.

Urban wastewater containing a wide range of pollutants such as organic compounds, heavy metals, petroleum products, pharmaceuticals and microorganisms is hazardous and with insufficient or no treatment and can lead to pollution of water bodies, destruction of ecosystems, death of aquatic organisms. In the conditions of the modern world with the rapid development and growth of cities, industry and technology wastewater to treatment facilities come unevenly, which adversely affects the effectiveness of their treatment. In order to justify measures to mitigate the effects of these phenomena, it is necessary to investigate the degree of unevenness of hydraulic and mass loads in wastewater disposal systems. In this paper we analyze the materials studying wastewater inflow regimes and fluctuations of pollutant concentrations in different periods. Unsteadiness of wastewater inflow during storm events is determined by changes in domestic wastewater flow rates by hours of the day and periods of the year, as well as by rainwater inflow.

*Keywords:* wastewater, treatment facilities, pollutants, hourly flow rate, monthly flow rate.

Расходы дождевых вод в канализационных сетях формируется в результате сложных процессов, происходящих как на поверхности водосбора, так и в самой канализационной системе.

Для корректных расчета и работы очистных сооружений важно правильным образом выбрать расчетный период поступления сточных вод. Для корректности расчета, в соответствии с требованиями 1. СП 32.13330.2018 [1], необходимо выбирать трехмесячный период, в который поступление сточных вод на очистные сооружения максимальный. Поступление сточных вод на очистные сооружения значительно колеблется. Данные колебания носят случайный характер, что может вызывать трудности при эксплуатации очистных сооружений, снижению эффективности работы и ухудшению качества очистки.

Основными факторами, влияющими на изменение нагрузки на очистные сооружения, являются:

- сезонные колебания объемов и концентраций загрязняющих веществ производственно-бытовых и инфильтрационных сточных вод
- суточные колебания расхода
- кратковременное повышение нагрузки, вызванное поступлением поверхностного стока

При анализе сезонных колебаний сточных вод важно знать не только максимальные расходы, но также и минимальные [1]. Минимальные расходы сточных вод соответствуют периодам сухой погоды, которые, обычно, приходится на летний период.

При изучении месячных колебаний расхода, в дни без выпадения осадков, по месяцам года имеет минимальные значения в период июня-августа. Месячные колебания расходов сточных вод цикличны, с характерными периодами экстремумов: минимуме – в июле-августе.

Величина расхода зависит от притока инфильтрационных вод. Исследования [2] показывает, что данный расход связан преимущественно с утечками из систем канализации и водоснабжения, а также из тепловых сетей. Так же ряд исследователей акцентируют внимание на роли атмосферных осадков в формировании инфильтрационного питания, отмечено что поступающая в грунт вода составляет 1–10 % дождевых вод [3].

Аналогично снижению расхода в летний период наблюдается и снижение концентраций загрязняющих веществ. Большая нагрузка на очистные сооружения наблюдается в зимнее время года, что связано как с увеличением расхода, так и с ростом концентрации загрязняющих веществ. В холодные периоды года возрастания притока сточных вод связано с выпадением дождей и увеличением количества талых вод. Величина стока дождевых вод зависит от типов выпадения дождя, определенных в работе А. М. Курганова [4], а также от состава грунтов, их влажности, характеристики водосбора.

Состав дождевого стока изучался в большом количестве трудов, наиболее важным в этом вопросе является изучение изменения концентраций во времени [5]. В работах Е. В. Теплякова [6] было выявлено, что концентрация дождевого стока убывает в течении дождя. П. Н. Правошинский выявил, что наибольшая загрязненность соответствует максимальному расходу дождевых вод. Помимо этого, ряд других авторов [7, 8] отмечают наличие нескольких максимумов загрязненности в течении дождя, что связано с перераспределением загрязнений в коллекторе. Вторичное загрязнение обусловлено размыванием отложений в сетях при увеличении интенсивности выпадения дождя.

Основными показателями загрязненности дождевых стоков являются взвешенные вещества, БПК, ХПК, растворимые примеси, боль-

пное количество тяжелых металлов. Нефтепродукты [9]. Наибольшая загрязненность для дождевых стоков наблюдается осенью, а наименьшая – летом. [10].

Так же периодом повышенного расхода сточных вод можно назвать период снеготаяния. Расходы талых вод оказываются значительно меньше расходов дождевых вод, однако они так же оказывают существенную нагрузку на станции очистки. Характер снеготаяния неравномерный, с прерываниями в ночные часы или периоды заморозок. Наибольшая интенсивность водоотдачи наблюдается в течении 10 часов, обычно с 10 утра до 20 часов вечера. Талые воды содержат в 1,5–2 раза больше взвешенных веществ нежели дождевые воды. Они характеризуются высоким содержанием хлоридов, солей тяжелых металлов и нефтепродуктов. В начале весеннего снеготаяния сток наиболее загрязнен, чем в конце периода [11].

Поступление сточных вод является нестационарным процессом. В зависимости от периода оно подвержено различным изменениям. Так в сухую погоду оно подвержено часовым, суточным, недельным и сезонным изменениям. В период выпадения осадков так же влияют изменения, обусловленные атмосферными явлениями.

При изучении часовых колебаний стока была отмечена тенденция увеличения количества стока аналогично увеличению потребления горячей воды. Замечено значительное уменьшение расходов сточных вод в ночные и утренние часы. Увеличение расхода сточных вод наблюдается в период с 10 до 20 часов. При этом выраженный максимум может отличаться в зависимости от специфики деятельности населения.

Так же в ряде случаев наблюдается второй, меньший по величине пик, приходящийся преимущественно на вторую половину дня [12]. Таким образом, цикл поступления сточных вод на очистные станции, отражает режим жизни активной части населения. Суточные колебания концентрации загрязняющих веществ совпадают с колебаниями поступления сточных вод. Пики колебаний концентраций загрязняющих веществ приходятся на 12–13 часов. В ночное время, аналогично расходу сточных вод, наблюдается характерное снижение концентраций с неявным минимумом в 6–8 часов. В период снеготаяния поступление сточных вод на очистные сооружения зависит

от продолжительности периода оттепели, состояния снежного покрова, характера уборки улиц. Наибольшим влиянием обладает продолжительность периода оттепели, именно она определяет характер поступления потока. В период снеготаяния максимальный приток сточных вод на очистные сооружения приходится на период 12–15 часов, что характерно для времени наибольшей солнечной активности, вызывающей активное таяние снежных покровов. В общем процесс снеготаяния и стока талых вод занимает 8–12 часов в сутки. Начало процесса приходится на 10–11 часов утра и заканчивается в 18–20 часов вечера. В ночное время интенсивность поступления талых вод на очистные сооружения заметно снижается, что связано с ночным изменением температуры.

Для периода снеготаяния так же характерно заметное снижение температуры сточных вод, поступающих на станцию очистки. Эта температура может опускаться ниже 7–8 °С. Приток сточных вод в период выпадения дождей зависит от изменений расходов бытовых сточных вод по поступлениям дождевых вод, часам суток и периодам года. Формирование расхода существенно зависит от времени выпадения дождя, так выпадение осадков в ночное время не сильно повлияет на нагрузку очистных сооружений. Однако если дождь придется на дневное время, это существенно скажется на общем расходе сточных вод.

В работе [13] учтены особенности выпадения дождей для города Санкт-Петербург и определены зависимости, по которым возможно определить прогнозируемый расход сточных вод в период выпадения дождей. Превышение максимального расхода в период поступления дождевого стока по сравнению с притоком бытовых сточных вод в период сухой погоды принят равным 1,3. В подведении итогов хотелось бы подчеркнуть важность данных исследований и актуальность темы.

Повторное рассмотрение темы требуется исходя из изменения фактических гидравлических и массовых нагрузок на многие очистные сооружения, которые изменились по таким причинам как:

- изменения удельного водопотребления и приведенного количества обслуживаемых жителей;
- поведения уплотнительных застроек, в результате которых доля водопроницаемых покрытий уменьшилась;

– изменения климата, в результате которого частота и интенсивность дождей увеличились. Аналогичное исследование проводилось под руководством профессора Мишукова Б. Г. В 1998 году.

Таким образом, выполненный анализ результатов научных исследований в данной предметной области показал, что в основном они посвящены изучению часовых, годовых и месячных неравномерностей. В то же время в соответствии с требованиями СП 32.13330.2018 [1] «... при получении расчетных величин концентраций загрязняющих веществ в поступающих сточных водах в качестве базовых следует использовать массивы значений массовых нагрузок по загрязняющим веществам, определяемых как произведение расхода сточных вод в конкретные сутки на концентрацию данного загрязняющего вещества в пробе, отобранной в эти сутки». По этим причинам актуальность исследования суточных неравномерностей в настоящее время возросла, а в литературных источниках информации по данному вопросу недостаточно.

#### **Литература**

1. СП 32.13330.2018. СНиП 2.04.03-85 Канализация. Наружные сети и сооружения.
2. *Медведев Г. П.* Канализация городов ФРГ. – Л. : Стройиздат, 1982.
3. Проблемы инженерной геологии городов. – М. : Наука, 1983.
4. *Курганов А. М., Алексеев М. И., Быков А. П.* «Расчетная продолжительность дождей для систем водоотведения», ж. «Водоснабжение и санитарная техника», № 2, 1996.
5. Материалы международного симпозиума по очистке сточных вод от азота и фосфора (Россия, Финляндия, ФРГ, Франция), СПб, 13–14 февраля 1992 г.
6. *Тепляков Е. Р.* «К вопросу о санитарной оценке поверхностного стока городов» в кн.: «Вопросы общей и коммунальной гигиены» труды ЛСГМИ, том 26, М., 1956.
7. *Корниль Б. Г., Хват В. М.* «О математическом моделировании стока дождевых вод с застроенных территорий» в кн.: «Проблемы охраны вод». – М. : Стройиздат, 1979, № 10.
8. *Курганов А. М.* «Закономерности формирования и движения дождевых стоков в безнапорных трубопроводах» : дисс. на соискание д. т. н., Л., 1980.
9. *Лейте В.* Определение органических загрязнений питьевых, природных и сточных вод. – М. : Химия, 1975.
10. *Молоков М. В., Шигорин Г. Г.* Дождевая и общесплавная канализация. – М. : Изд-во МХХ РСФСР, 1954.

11. *Шигорин Г. Г.* Общесплавная система канализации. – М. : Изд-во МКХ РСФСР, 1962.

12. «Канализация населенных мест и промпредприятий», справочник проектировщика под ред. В. Н.Самохина. – М. : Стройиздат, 1981.

13. *Болдаков Е. В.* «Проект норм стока ливневых вод с малых бассейнов». – М. : Дориздат, 1949.

УДК 621

Чжан Ифэй,  
студент

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
E-mail: zyf9313167098@yandex.ru

Zhang Yifei,  
student

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
E-mail: zyf9313167098@yandex.ru

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ДВИЖЕНИЯ MINI ROV

### MINI ROV DRIVING STABILITY ANALYSIS

В статье рассматриваются вопросы устойчивости движения дистанционно управляемого подводного аппарата MINI ROV. Основное внимание уделено моделированию динамики его движения, анализу влияния различных параметров конструкции, а также разработке критериев статической и динамической устойчивости. [6, 7]

Основные положения исследования: 1. Создание системы координат – установлены геодезическая и собственная системы координат, используемые для описания движения ROV. 2. Формулирование динамических уравнений – разработаны математические модели для вычисления движения аппарата с учетом его массы, центра тяжести и моментов инерции. [1] 3. Оценка устойчивости – введены показатели статической и динамической устойчивости, определяемые через углы атаки и моменты тангажа. [5,8] 4. Численное моделирование – выполнены гидродинамические расчеты с использованием программных комплексов Gambit и Ansys.

Полученные результаты: 1. Проведен анализ влияния угла наклона хвостового оперения на устойчивость движения. Определены оптимальные углы ( $15^{\circ}$ – $30^{\circ}$ ), при которых коэффициенты сопротивления и подъемной силы минимальны. 2. Исследована зависимость устойчивости от высоты хвостового оперения. Оптимальный диапазон высоты составляет  $2D/10$ – $3D/10$ , что обеспечивает устойчивое движение при минимальных потерях гибкости. 3. Подтверждено, что добавление хвостового оперения повышает устойчивость ROV к внешним возмущениям.

*Ключевые слова:* MINI ROV, устойчивость движения, динамическое моделирование, хвостовое оперение, гидродинамический анализ.

This study examines the driving stability of a Miniature Remotely Operated Vehicle (MINI ROV) by developing a comprehensive dynamic model and analyzing various factors influencing its stability. The research aims to enhance the operational reliability of MINI ROVs by optimizing their structural and hydrodynamic properties.

Methodology: 1. Coordinate System Development – The study establishes geodetic and body-fixed coordinate systems to accurately describe the motion of the ROV. 2. Dynamic Modeling – A set of six-degree-of-freedom equations is derived to characterize the vehicle's movement, incorporating mass distribution, center of gravity, and moments of inertia. 3. Stability Assessment – Both static and dynamic stability indicators are formulated based on pitch moments and hydrodynamic forces acting on the vehicle. 4. Computational Analysis – Hydrodynamic simulations are conducted using Gambit and Ansys software to evaluate the effects of different design parameters.

Key Findings: 1. The influence of tail fin inclination on stability is analyzed, identifying the optimal angles ( $15^{\circ}$ – $30^{\circ}$ ) that minimize resistance and maximize lift force efficiency. 2. The impact of tail fin height is examined, revealing that an optimal height range of  $2D/10$  to  $3D/10$  enhances the ROV's overall stability while maintaining maneuverability. 3. Computational experiments confirm that incorporating a tail fin significantly improves resistance to external disturbances.

*Keywords:* MINI ROV, driving stability, dynamic modeling, tail fin optimization, hydrodynamic analysis.

## 1. Моделирование и анализ динамических уравнений

### 1.1. Создание системы координат

Для лучшего изучения законов движения MINI ROV были установлены две системы координат: геодезическая и собственная системы координат. Геодезическая система координат является инерциальной системой отсчета движения ROV. В данной системе фиксированная точка на уровне моря, обозначенная как E, выбрана в качестве начала координат. Ось направлена вперед вдоль направления движения ROV, ось вертикальна вверх, а ось определяется по правилу правой руки (рис. 1).

Собственная система координат, также называемая подвижной, фиксирована на корпусе ROV, при этом начало координат O совпадает с центром массы ROV, ось направлена вдоль продольной оси к голове ROV, ось перпендикулярна продольной оси, а ось – симметричной плоскости корпуса (рис. 1 и 2).

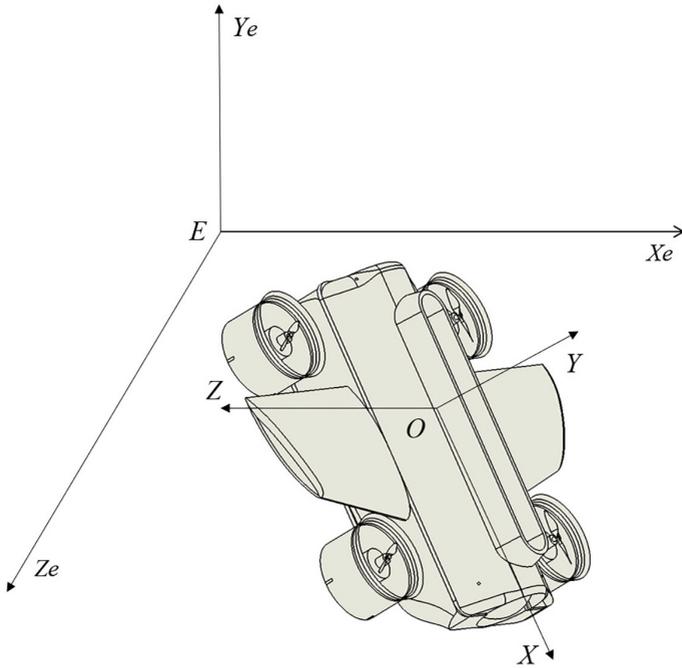


Рис. 1. Геодезическая система координат и собственная система координат

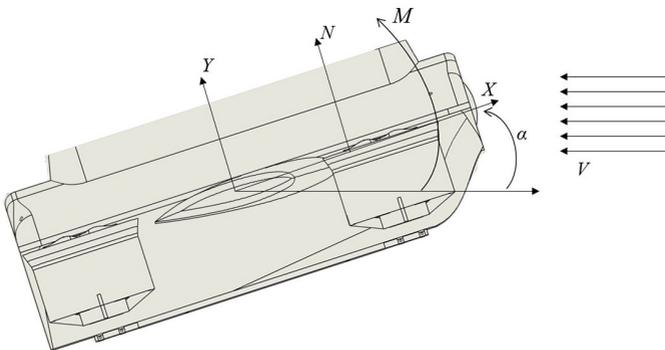


Рис. 2. Силы, вызванные изменением угла атаки

Таблица 1

**Определение состояния движения РОВ**

Состояние движения	Ось X	Ось Y	Ось Z
Поступательное	Вперед/назад	Подъем/ погружение	Боковое движение
Вращательное	Крен	Вращение	Тангаж

Таблица 2

**Обозначения компонент движения**

Ось координат	x	y	z
Скорость $V$	$V_x$	$V_y$	$V_z$
Угловая скорость $\omega$	$\omega_x$	$\omega_y$	$\omega_z$
Сила $F$	$F_x$	$F_y$	$F_z$
Момент силы $M$	$M_x$	$M_y$	$M_z$

1.2. Построение динамического уравнения

Динамическое уравнение для MINI ROV имеет следующий вид:

$$\left. \begin{aligned}
 F_x &= m \left[ \bar{V}_x - V_y \omega_z + V_z \omega_y - x_G (\omega_y^2 + \omega_z^2) + y_G (\omega_x \omega_y - \bar{\omega}_z) + z_G (\omega_x \omega_z - \bar{\omega}_y) \right] \\
 F_y &= m \left[ \bar{V}_y - V_z \omega_x + V_x \omega_y - x_G (\omega_z^2 + \omega_x^2) + z_G (\omega_y \omega_z - \bar{\omega}_x) + x_G (\omega_y \omega_x - \bar{\omega}_z) \right] \\
 F_z &= m \left[ \bar{V}_z - V_x \omega_y + V_y \omega_x - z_G (\omega_x^2 + \omega_y^2) + x_G (\omega_z \omega_x - \bar{\omega}_y) + y_G (\omega_z \omega_y - \bar{\omega}_x) \right] \\
 M_x &= I_x \bar{\omega}_x + (I_z - I_y) \omega_y \omega_z + m \left[ y_G (\bar{V}_z + V_y \omega_x - V_x \omega_y) - z_G (\bar{V}_y + V_x \omega_z - V_z \omega_x) \right] \\
 M_y &= I_y \bar{\omega}_y + (I_x - I_z) \omega_z \omega_x + m \left[ z_G (\bar{V}_x + V_z \omega_y - V_y \omega_z) - x_G (\bar{V}_z + V_z \omega_x - V_x \omega_x) \right] \\
 M_z &= I_z \bar{\omega}_z + (I_y - I_x) \omega_x \omega_y + m \left[ x_G (\bar{V}_y + V_x \omega_y - V_y \omega_x) - y_G (\bar{V}_x + V_z \omega_y - V_z \omega_z) \right]
 \end{aligned} \right\} (1)$$

где  $m$  – масса ROV;  $x_G, y_G, z_G$  – координаты центра масс ROV;  $I_G$  – момент инерции ROV относительно осей  $Ox, Oy, Oz$ . Если известны состоя-

ние движения и внешние силы, воздействующие на ROV в определенный момент времени, то можно определить его состояние в следующий момент времени и построить систему моделирования движения [4].

## 2. Показатели устойчивости движения MINI ROV

### 2.1. Показатели статической устойчивости

Согласно определению статической устойчивости, чтобы определить устойчивость ROV при воздействии внешних возмущений, необходимо проанализировать изменения момента тангажа  $M(\alpha)$ , вызванного углом атаки  $\alpha$ , в момент возникновения возмущения. Во время движения ROV угол атаки  $\alpha$  вызывает момент тангажа  $M(\alpha)$  и вертикальную силу  $N(\alpha)$ , как показано на рис. 2. Для оценки статической устойчивости вводится показатель, равный отношению момента тангажа  $M(\alpha)$  к вертикальной силе  $N(\alpha)$ :

$$S_\alpha = \left| \frac{M(\alpha)}{N(\alpha) \cdot L} \right| \quad (2)$$

### 2.2. Показатели динамической устойчивости

При воздействии внешних возмущений на ROV, наряду с моментом тангажа  $M(\alpha)$  и вертикальной силой  $N(\alpha)$ , возникают вращающиеся силы  $N(r)$  и вращающиеся моменты  $M(r)$ , как показано на рис. 3. Если  $N(\alpha) + N(r) = 0$ , то ROV находится в состоянии динамической устойчивости. Для оценки динамической устойчивости вводится показатель, равный отношению вращающей силы  $N(r)$  к вращающему моменту  $M(r)$ :

$$S_\alpha = \left| \frac{M(r)}{N(r) \cdot L} \right| \quad (3)$$

Объединенный показатель устойчивости  $G_r$  определяется следующим образом:

$$G_r = 1 - \frac{S_\sigma}{S_r} \quad (4)$$

Если  $G_r < 0$ , движение является неустойчивым; если  $0 < G_r < 1$ , движение является устойчивым; если  $G_r > 1$ , движение является статически устойчивым [9, 10].

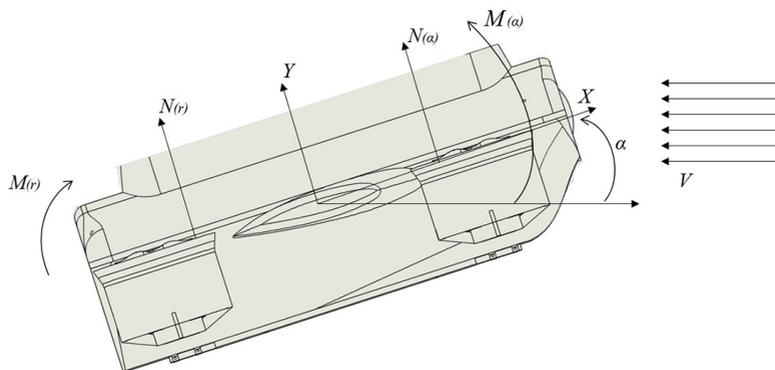


Рис. 3. Силы продольного положения и вращения

### 3. Анализ устойчивости движения MINI ROV

#### 3.1. Построение физической модели

Для моделирования использовалось программное обеспечение Gambit, где были определены сетка и граничные условия. Область расчета размером  $6 \text{ м} \times 3 \text{ м} \times 3 \text{ м}$  позволяет обеспечить достаточное развитие потока вокруг ROV. Сетка представлена внутренними поверхностями для участков вокруг ROV, остальные границы являются жесткими стенками. Область заполнена несжимаемой жидкостью с вязкостью  $1,003 \times 10^{-3} \text{ Па}\cdot\text{с}$  и плотностью  $998,2 \text{ кг/м}^3$ . Схема сетки показана на рис. 4.

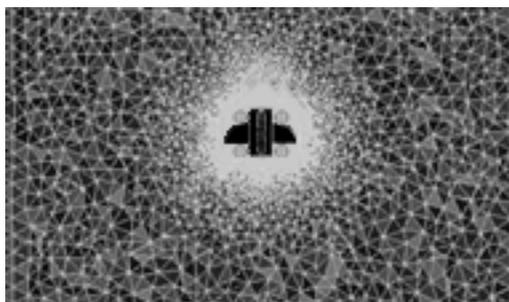


Рис. 4. Схема сетки

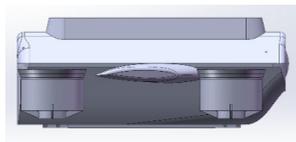
### 3.2. Вычисление модели

В данной работе принято, что вода является несжимаемой средой. Использована турбулентная модель  $k-\epsilon$ , пространственная дискретизация выполнена с использованием разностной схемы второго порядка. Для решения использован итерационный алгоритм SIMPLE, остаток равен 0,0001 [2]. Скорость ROV установлена на 3 м/с, а угол атаки – на начальное значение  $0^\circ$ . Площадь ортогональной проекции модели на плоскость  $y-oz$  равна  $0,044 \text{ м}^2$ , а на плоскость  $x-oz$  –  $0,114 \text{ м}^2$ . Параметры рассчитывались с помощью программного обеспечения для гидродинамических исследований Ansys. [3]

### 3.3. Влияние угла наклона хвостового оперения на устойчивость

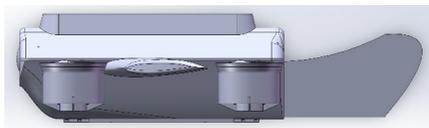
Для анализа были выбраны варианты с отсутствием хвостового оперения и с хвостовым оперением под углами  $15^\circ$ ,  $30^\circ$ ,  $45^\circ$  и  $60^\circ$ , как показано на рисунке 5. Результаты расчетов с использованием Ansys показывают значения сопротивления, подъемной силы, момента тангажа и момента вращения для каждого случая при скорости 3 м/с, приведенные в таблицах 3 и 4. Графики зависимости коэффициентов сопротивления и подъемной силы от угла наклона хвостового оперения приведены на рисунках 6 и 7.

Согласно рисунку 6, влияние хвостового оперения на коэффициент сопротивления минимально из-за небольшой площади проекции хвостового оперения на плоскость  $y-oz$ . На рисунке 7 показано, что увеличение угла наклона хвостового оперения приводит к увеличению асимметрии конструкции, что оказывает влияние на коэффициент подъемной силы. Суммарно, в диапазоне углов  $15^\circ$ – $30^\circ$  коэффициенты сопротивления и подъемной силы минимальны, что делает данный вариант наиболее оптимальным.

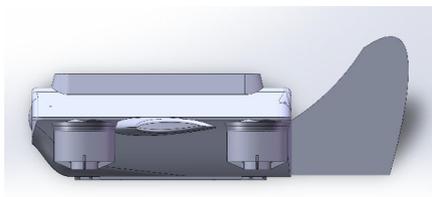


$0^\circ$

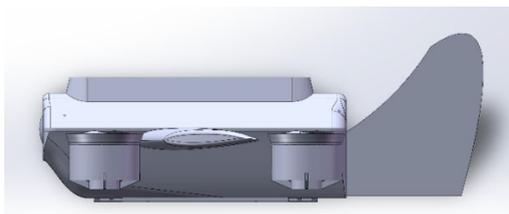
Рис. 5, начало. Модели хвостового оперения с различным углом наклона



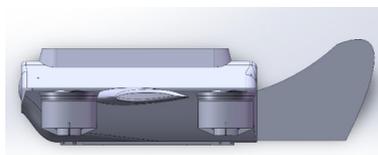
15°



30°



45°



60°

Рис. 5, окончание

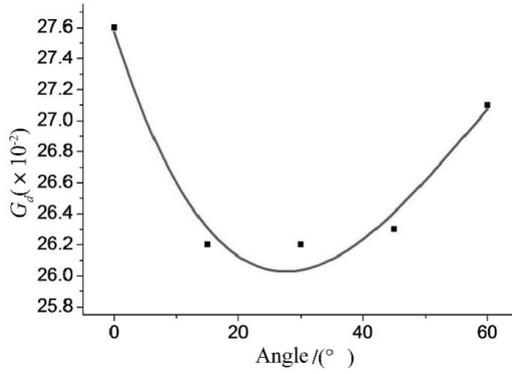


Рис. 6. Зависимость коэффициента сопротивления от угла наклона хвостового оперения

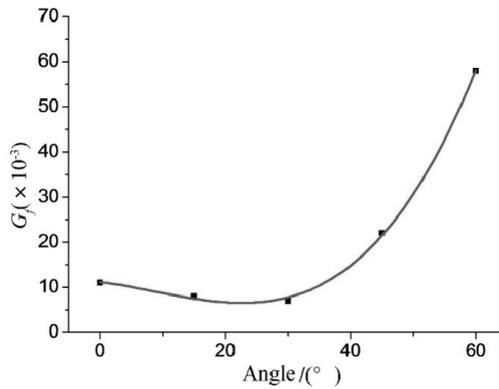


Рис. 7. Зависимость коэффициента подъемной силы от угла наклона хвостового оперения

Таблица 3

**Расчетные параметры для разных углов наклона хвостового оперения**

Параметр	Без хвоста	Хвост 15°	Хвост 30°
Сопrotивление, $H$	54,67	51,856	51,912
Подъемная сила, $H$	-5,676	-3,938	3,383
Момент тангажа, $H$ -м	-0,251	-0,191	-0,052
Момент вращения, $H$ -м	-1,475	0,321	-1,759
Коэффициент сопротивления	0,276	0,363	0,262
Коэффициент подъемной силы	0,011	0,008	0,007

Таблица 4

**Расчетные параметры для хвостового оперения под углами 45° и 60°**

Параметр	Хвост 45°	Хвост 60°
Сопrotивление, $H$	52,159	53,588
Подъемная сила, $H$	-11,274	-29,892
Момент тангажа, $H$ -м	-0,649	-1,036
Момент вращения, $H$ -м	-0,692	-1,401
Коэффициент сопротивления	0,263	0,271
Коэффициент подъемной силы	0,022	0,058

Таблица 5

**Показатели устойчивости для разных углов наклона хвостового оперения**

Показатель $S_a$	0,099	0,109	0,034	0,129	0,078
Показатель $S_r$	0,224	0,475	0,249	0,181	0,240
Показатель $G_r$	0,558	0,770	0,863	0,287	0,675

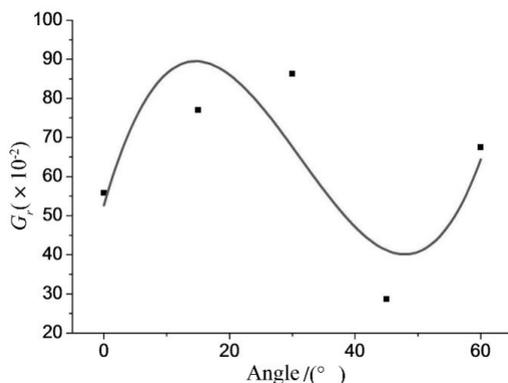


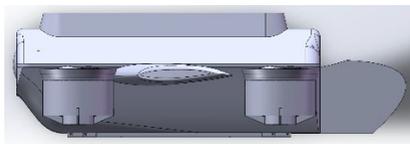
Рис. 8. Зависимость значения устойчивости  $G_r$  от угла наклона хвостового оперения

На основании таблицы 3, используя формулы (2) и (3), были рассчитаны показатели статической устойчивости  $S_a$  и динамической устойчивости  $S_r$ . Затем, с помощью формулы (4), был определен объединенный показатель устойчивости  $G_r$ , представленный в таблице 5. На графике (рисунок 8) показана зависимость  $G_r$  от угла наклона хвостового оперения. Из рисунка 8 следует, что для данного ROV наиболее оптимальная устойчивость достигается при углах наклона хвостового оперения в диапазоне от  $15^\circ$  до  $30^\circ$ .

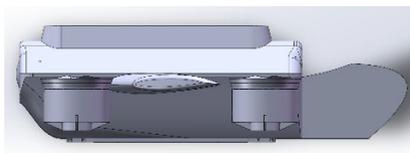
#### 3.4. Влияние высоты хвостового оперения на устойчивость

Расчеты показывают, что при расположении хвостового оперения в конце ROV его устойчивость значительно улучшается. Поэтому для хвостового оперения под углом  $15^\circ$ , установленного на конце ROV, была проанализирована зависимость устойчивости от высоты хвостового оперения. Были выбраны четыре различные высоты, как показано на рисунке 9.

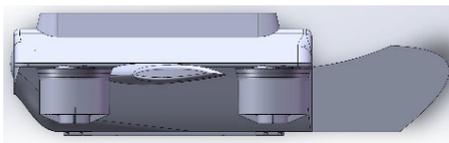
В качестве базовой толщины использована половина толщины корпуса ROV ( $D = 40$  мм). Высоты составляют  $D/10$ ,  $2D/10$ ,  $3D/10$ ,  $4D/10$ .



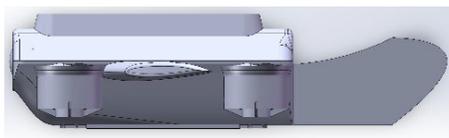
1D/10



2D/10



3D/10



4D/10

Рис. 9. Модели хвостового оперения с различной высотой

Таблица 6

## Расчетные параметры для разных высот хвостового оперения

Параметр	$\frac{V}{10}$	$\frac{2V}{10}$	$\frac{3V}{10}$	$\frac{4V}{10}$
Сопrotивление, Н	54,814	55,811	51,856	56,879
Подъемная сила, Н	-7,219	-10,147	-3,938	-18,232
Момент тангажа, Н-м	-1,721	0,005	-0,191	-0,231
Момент вращения, Н	-1,089	0,382	-0,191	1,191
Момент вращения, Н-м	0,319	-0,006	-0,068	0,030
Коэффициент сопротивления	0,277	0,282	0,262	0,287
Коэффициент подъемной силы	0,014	0,019	0,008	0,036

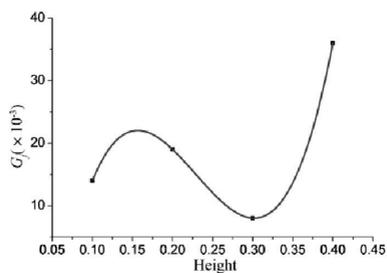


Рис. 10. Зависимость коэффициента сопротивления от высоты хвостового оперения

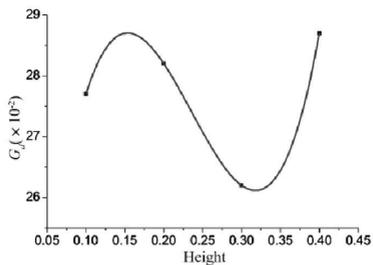


Рис. 11. Зависимость коэффициента подъемной силы от высоты хвостового оперения

При скорости 3 м/с расчеты показывают, что при высоте хвостового оперения 3D/10 коэффициенты сопротивления и подъемной силы минимальны.

Таблица 7

**Показатели устойчивости для разных высот хвостового оперения**

Показатель $S_a$	0,535	0,001	0,109	0,028
Показатель $S_r$	0,657	0,035	0,789	0,056
Показатель $G_r$	0,186	0,971	0,862	0,5

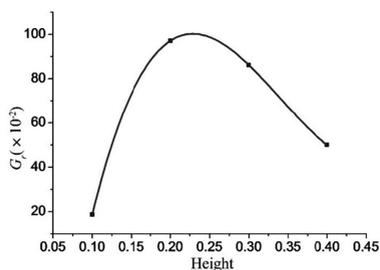


Рис. 12. Зависимость значения устойчивости  $G_r$  от высоты хвостового оперения

Из рисунка 12 следует, что при высотах хвостового оперения от 2D/10 до 3D/10 достигается наилучшая устойчивость микроволнового ROV. Таким образом, оптимальный диапазон высоты хвостового оперения составляет 2D/10–3D/10.

**4. Заключение**

1. Разработаны шестиосевые уравнения движения для анализа устойчивости ROV.

2. Проведен численный анализ влияния угла наклона хвостового оперения на устойчивость.

3. Определены оптимальные параметры хвостового оперения для обеспечения устойчивости при минимальных потерях гибкости.

4. Эксперименты подтвердили, что добавление хвостового оперения увеличивает устойчивость ROV к внешним возмущениям.

### Литература

1. Сюй Цзиньке, Ван Юйцзюнь, Хоу Баокэ и др. Текущее состояние и тенденции развития ROV // Автоматизация технологий. 2011. Т. 32, № 4. С. 72–74.
2. Синь Гуанхун, Фэн Дэчжун, Пань Жуонан. Проектирование и реализация малых ROV для наблюдения в мелководье // Применяемые технологии и исследования. 2015. № 4. С. 71–73.
3. Шэн Ян, Тан Ин, Чэнь Цзунхэн и др. Применение ROV в геологических исследованиях морских районов Китая // Передовые морские геологические исследования. 2013. Т. 29, № 11. С. 68–71.
4. Чжан Тьедун. Принципы проектирования подводных аппаратов // Издательство Харбинского инженерного университета. 2011.
5. Шэ Хуцин. Общая технология мин // Издательство оборонной промышленности. 2009.
6. Хао Яньчжун. Исследование стабильности подводных роботов // Чжэцзянский университет. 2009.
7. Цзо Хуйцзюнь, Ян Хуншэн. Теория и методы инновационного проектирования механических систем // Проектирование и исследование машин. 2018. Т. 34, № 4. С. 198.
8. Лю Чжаньвей. Размышления о инновационном проектировании механических изделий // Проектирование и исследование машин. 2018. Т. 34, № 4. С. 1–4.
9. Хуан Цзинцюань, Чжан Ювэнь. Гидродинамика торпед // Издательство Северо-Западного политехнического университета. 1989.
10. Шу Чжунчжоу. Динамическая стабильность // Издательство Южно-Западного транспортного университета. 1989.

УДК 628.2

Юй Шуайсянь,

аспирант

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

E-mail: yshuaixian@mail.ru

Yu Shuaixian,

postgraduate student

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

E-mail: yshuaixian@mail.ru

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСАЖДЕНИЯ ЧАСТИЦ В ТОНКОСЛОЙНОМ МОДУЛЕ

### MODELING PARTICLE DEPOSITION IN A LAMELLA MODULE

В данной работе представлено исследование осаждения частиц в новом тонкослойном модуле. Для улучшения эффективности осаждения межпластиночное пространство модуля разделяется на верхний канал движения сточных вод и нижний канал движения осадка, гидравлически связанный с верхним рядом отверстий. С целью анализа кинетики осаждения частиц предлагается математическая модель, основанная на теории осаждения в потоке малой глубины. Математическая модель для прогнозирования траектории движения частиц учитывает действующие на частицы силы плавучести, тяжести, сопротивления жидкости и дополнительной силы потока в канале удаления осадка, что позволило составить уравнение баланса сил. Данное исследование позволит получить теоретическое обоснование и практические рекомендации для проектирования новой конструкции тонкослойного модуля.

*Ключевые слова:* тонкослойный модуль, осаждение частиц, траектория движения частиц.

This study investigates particle deposition in a novel lamella module. To improve deposition efficiency, the interplate space is divided into an upper wastewater flow channel and a lower sludge flow channel, hydraulically connected to the upper row of orifices. To analyze the kinetics of particle deposition, a mathematical model based on shallow-depth sedimentation theory is proposed. The model for predicting particle trajectories incorporates buoyancy, gravity, fluid resistance, and an additional flow force acting on particles within the sediment removal channel, enabling the formulation of a force balance equation. This work provides theoretical justification and practical design recommendations for optimizing lamella modules.

*Keywords:* lamella module, particle deposition, particle trajectory.

Отстойники с тонкослойными модулями достаточно широко используются для очистки сточных вод [1] с целью удаления взвешенных частиц. Применение тонкослойного модуля позволяет значительно повысить эффективность осаждения [2]. Большинство современных исследований основывается на результатах осаждения частиц, а не на их специфическом поведении при движении, что недостаточно для полного представления и объяснения процесса отделения частиц в тонкослойных модулях. В работах [3–4] представлена математическая модель осаждения частиц, основанная на теории движения частиц в межпластинчатом пространстве. В работах [5–6] изучен механизм влияния наклонной пластины на усиление эффекта осаждения частиц. В работе [7] создана теоретическая модель, основанная на скорости осаждения частиц, что способствует повышению точности расчетов.

Целью данного исследования является углубленное изучение характеристик движения частиц в классических и новых тонкослойных модулях.

Основными задачами исследования являются создание уравнения, описывающего движение частиц в межпластинчатом пространстве для прогноза траектории осаждения в тонкослойном модуле новой конструкции. С помощью программы ANSYS FLUENT были смоделированы условия течения в модулях различной конструкции, что послужило основой для исследования по анализу характеристик движения частиц. Когда частицы находятся в состоянии Стокса, можно пренебречь инерционными силами.

Частицы в воде подвержены не только действию Объемных сил (сила Архимеда и сила тяжести) [8], но и множеству других сил, включая силы сопротивления жидкости, силу Бассета, поднимающую силу, вызванную вращением частиц (эффект Магнуса), поднимающую силу, вызванную сдвигом жидкости (сила Саффмана), и силы взаимодействия между частицами [9]. Под совместным действием этих сил частицы в тонкослойном модуле будут двигаться по определенной траектории. Для обеспечения точности при создании математической модели движения частицы и вместе с тем упрощения сложной задачи были сделаны следующие допущения [10]:

1. Влияние пограничного слоя на движение частиц игнорируется;

2. Частицы считаются жесткими однородными сферами, а жидкость – несжимаемой;
3. Движения частиц в тонкослойном модуле считаются независимыми друг от друга;
4. Частицы не деформируются;
5. Частицы не контактируют друг с другом.

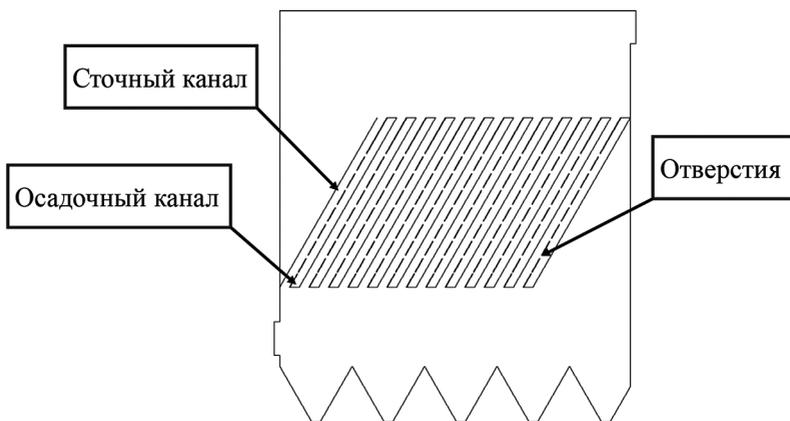


Рис. 1. Конструкция тонкослойного модуля

В данной работе предложена новая конструкция тонкослойного модуля (рис. 1). Конструктивно межпластинчатое пространство модуля разделено на два канала: канал движения сточных вод и канал движения осадка. Канал осадка представляет собой замкнутое пространство, соединенного с нижним трубопроводом отстойника через клапан сброса осадка. Между каналом осадка и каналом сточных вод имеется ряд связующих отверстий.

На рис. 2, а показано распределение скоростей частиц в классическом тонкослойном модуле при входной скорости  $V = 0,01$  м/с. Это распределение оказывает непосредственное влияние на процесс осаждения. Скорость частиц значительно меняется по высоте тонкослойного модуля. В верхней части межпластинчатого пространства скорость движения частиц оставалась постоянной и соответствовала скорости потока жидкости 0,01 м/с; в нижней части скорость движе-

ния частиц варьировалась от 0,002 до 0,006 м/с. Такая ситуация усложняет процесс осаждения частиц.

Рассмотрим силы, оказывающие влияние на движение частиц в классическом тонкослойном модуле (рис. 2, б). Среди всех этих сил главную роль играют силы Архимеда, силы тяжести и силы сопротивления жидкости [11]. Для изучения кинематических характеристик частицы покажем векторы указанных сил на схеме. Поток воды поступает в модуль вертикально. Модуль состоит из наклонных пластин, которые наклонены к горизонтальной плоскости под углом  $\theta$ . В данном случае рассматривается плоская задача. Начало координат плоскости  $XOY$  находится на верхней пластине. Ось  $OY$  параллельна на, а  $OX$  нормальна к пластинам модуля.

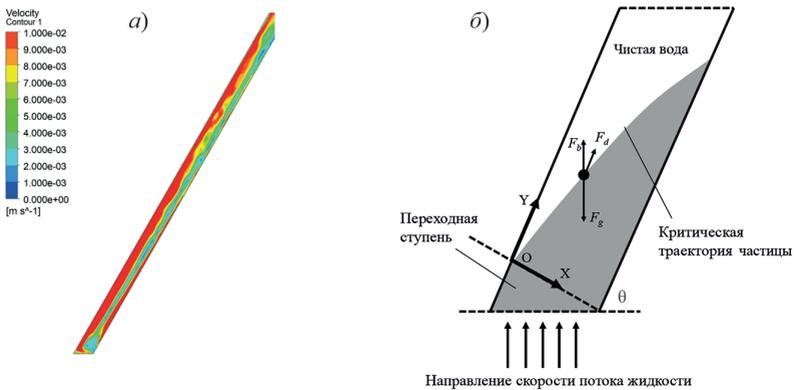


Рис. 2. Классический тонкослойный модуль:  
 а – поле скорости частиц в межпластинчатом пространстве;  
 б – силы, действующие на частицу

Для моделирования осаждения частиц необходимо найти зависимость для каждой силы.

Выражение для массы частицы имеет следующий вид:

$$m_q = \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q \quad (1)$$

где  $r_q$  – радиус частиц, м;  $\rho_q$  – плотность частиц, кг/м<sup>3</sup>.

Выражение для силы тяжести частицы имеет следующий вид:

$$F_g = m_q g = \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_q g \quad (2)$$

где  $g$  – ускорение свободного падения,  $\text{м/с}^2$ .

Выражение для силы Архимеда имеет следующий вид:

$$F_b = \frac{4}{3} \pi r_q^3 \rho_{жс} g \quad (3)$$

где  $\rho_{ж}$  – плотность жидкости,  $\text{кг/м}^3$ .

В несжимаемой сплошной жидкости частицы испытывают силу сопротивления. Направление этой силы всегда противоположно направлению движения частицы, а ее величина зависит от размера, диаметра и характеристик частиц, а также от скорости и свойств жидкости. Выражение для силы сопротивления жидкости имеет следующий вид:

$$F_d = C_D \frac{\pi r_q^2}{2} \rho_{жс} (u_q - u_{жс})^2 \quad (4)$$

где  $C_D$  – коэффициент сопротивления;  $u_q$  – скорость частиц,  $\text{м/с}$ ;  $u_{жс}$  – скорость жидкости,  $\text{м/с}$ .

Коэффициент сопротивления зависит от режима движения частиц в потоке и определяется числом Рейнольдса  $Re$  [12]. Его можно определить с помощью следующей зависимости:

$$C_D = \frac{24 \left( 1 + 0,17 Re^{\frac{2}{3}} \right)}{Re} \quad (5)$$

Далее определим скорость оседания частиц.

Когда частица достигает установившейся скорости оседания, векторная сумма сил равна нулю, и достигается состояние механического равновесия. По второму закону Ньютона уравнение движения частицы вдоль оси  $y$  имеет следующий вид:

$$F_g \sin \theta - F_b \sin \theta - F_d = m_q \frac{du}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{4}{3} \pi r_c^3 (\rho_c - \rho_{жс}) g \sin \theta - C_D \frac{1}{2} \rho_{жс} \pi r_c^2 (u_c - u_{жс})^2 = 0 \quad (7)$$

Когда скорость осаждения частиц превышает скорость потока, выражение скорости осаждения преобразуется в следующий вид:

$$u_c = u_{жс} - \sqrt{\frac{8r_c g (\rho_c - \rho_{жс}) \sin \theta}{3C_D \rho_{жс}}} \quad (8)$$

Когда скорость оседания частиц менее скорости потока, выражение скорости оседания преобразуется в следующий вид:

$$u_c = u_{жс} + \sqrt{\frac{8r_c g (\rho_c - \rho_{жс}) \sin \theta}{3C_D \rho_{жс}}} \quad (9)$$

Пользуясь выражением для скорости оседания частиц можно получить следующее уравнение траектории движения:

$$x(t) = x_0 \pm t \left( u_{жс} \cos \theta \pm \sqrt{\frac{8r_c g (\rho_c - \rho_{жс}) \sin \theta \cos^2 \theta}{3C_D \rho_{жс}}} \right) \quad (10)$$

$$y(t) = y_0 \pm t \left( u_{жс} \sin \theta \pm \sqrt{\frac{8r_c g (\rho_c - \rho_{жс}) \sin^3 \theta}{3C_D \rho_{жс}}} \right) \quad (11)$$

где  $x_0, y_0$  – начальные положения частиц в модуле;  $t$  – время движения частиц, с.

Полученная математическая модель описывает кинематические свойства частиц в классическом тонкослойном модуле. Далее мы рассчитаем кинематические свойства частиц в новом тонкослойном модуле на основе этой модели.

На рис. 3, а показано поле скорости частиц внутри нового тонкослойного модуля при входной скорости  $V = 0,01$  м/с. Видно, что скорость частиц в модуле значительно снижена по сравнению с классическим модулем из-за наличия выпускного клапана в канале осадка.

Скорость частиц в канале осадка варьируется от 0,005 м/с до 0,01 м/с. Уделим внимание распределению скоростей частиц в канале

осадка. В этой области скорость частиц варьируется от 0,000 до 0,005 м/с, что значительно повышает эффективность осаждения.

Рассмотрим силы, определяющие движение частицы в новом тонкослойном модуле (рис. 3, б). В канале движения сточной воды силы на частицы такие же, как в описанной выше модели. Рассмотрим силы в канале осадка. На нижний конец канала действует дополнительная сила потока воды, который удаляется из модуля. Влияние на движение частиц оказывают такие силы, как силы тяжести, силы Архимеда и силы сопротивления потоку воды. Кроме того, на частицы действуют силы, обусловленные ускорением потока воды. Аналогично определим зависимость для каждой силы.

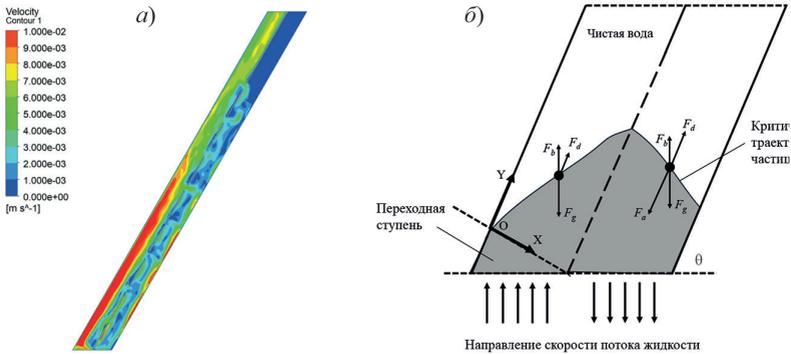


Рис. 3. Новый тонкослойный модуль  
 а – поле скорости частиц в межпластинчатом пространстве;  
 б – силы, действующие на частицу

Клапан на канале осадка всегда открыт, и расход в результате соответствует следующему выражению:

$$Q = \pi r_{\kappa}^2 u_{\kappa} \quad (12)$$

где  $r_{\kappa}$  – радиус клапана, м;  $u_{\kappa}$  – скорость в клапане, м/с.

Этот расход вызывает нисходящее ускорение в канале осадка, что решается уравнением импульса:

$$a = \frac{Q \cdot \Delta u_{\kappa}}{V_{\kappa} \cdot \rho_{\text{ж}}} \quad (13)$$

где  $V_{\kappa}$  – объем жидкости, вытекающей из клапана.

При этом воздействие сил на частицы в основном такое же, как описано выше.

Дополнительная сила воздействия потока воды на частицы имеет следующий вид:

$$F_a = \frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \rho_{\text{ч}} a \quad (14)$$

Определим скорость оседания частиц в новом модуле. По второму закону Ньютона уравнение движения частицы вдоль оси-у имеет следующий вид:

$$F_g \sin \theta + F_a - F_d - F_b \sin \theta = m_{\text{ч}} \frac{dv}{dt} \quad (15)$$

$$\frac{4}{3} \pi r_{\text{ч}}^3 \left[ g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \rho_{\text{ч}} \frac{Q \cdot \Delta u_{\kappa}}{V_{\kappa} \cdot \rho_{\text{ж}}} \right] - C_D \frac{\pi r_{\text{ч}}^2}{2} \rho_{\text{ж}} (u_{\text{ч}} - u_{\text{ж}})^2 = 0 \quad (16)$$

При этом скорость оседания частиц всегда превышает скорость потока жидкости. Следовательно, получим скорость оседания частиц:

$$u_{\text{ч}} = u_{\text{ж}} - \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}}}{3C_D \rho_{\text{ж}}} \left[ g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\rho_{\text{ч}} Q \cdot u_{\kappa}}{V_{\kappa} \cdot \rho_{\text{ж}}} \right]} \quad (17)$$

Уравнения траектории движения частиц будут иметь следующий вид:

$$x(t) = x_0 + t \left( u_{\text{ж}} \cos \theta - \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}} \cos^2 \theta}{3C_D \rho_{\text{ж}}} \left[ g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{ж}}) + \frac{\rho_{\text{ч}} Q \cdot \Delta u_{\kappa}}{V_{\kappa} \cdot \rho_{\text{ж}}} \right]} \right) \quad (18)$$

$$y(t) = y_0 + t \left( - \sqrt{\frac{8r_{\text{ч}} \sin^2 \theta}{3C_D \rho_{\text{ж}}}} \left[ \frac{u_{\text{жс}} \sin \theta - g \sin \theta (\rho_{\text{ч}} - \rho_{\text{жс}}) + \frac{\rho_{\text{ч}} Q \cdot \Delta u_{\text{к}}}{V_{\text{к}} \cdot \rho_{\text{жс}}}}{\rho_{\text{жс}}} \right] \right) \quad (19)$$

Следует отметить, что результаты данной работы основаны на теоретических выводах. Точность и применимость модели на практике необходимо оценить с помощью дальнейшего проведения лабораторного и производственного эксперимента. Полученные зависимости могут служить теоретическим обоснованием для разработки методики инженерного расчета тонкослойного модуля новой конструкции.

В данном исследовании рассмотрено движение частиц в новом тонкослойном модуле, и построена математическая модель на основе теории осаждения частиц в потоке малой глубины. Модель создана на основе уравнения баланса сил для жестких однородных сферических частиц. На основе созданной математической модели получены уравнения траектории частиц, которые могут быть использованы для дальнейшего проектирования и оптимизации тонкослойного модуля, а также для последующих экспериментальных исследований.

### Литература

1. Kapoor B., Acrivos A. (1995) Sedimentation and sediment flow in settling tanks with inclined walls. *Journal of Fluid Mechanics* 290:39-66. Doi:10.1017/S0022112095002412.
2. Chintokoma G., Machunda R., Njau K. (2015) Optimization of Sedimentation Tank Coupled with Inclined Plate Settlers as a Pre-treatment for High Turbidity Water. *Journal of Environment and Earth Science* 5:11-23.
3. Galvin K., Nguyentranlam G. Influence of parallel inclined plates in a liquid fluidized bed system, *Chem. Eng. Sci.* 57 (7) (2002) 1231–1234.
4. Nguyentranlam G., Galvin K. P. Applications of the Reflux Classifier in solid–liquid operations, *Int. J. Miner. Process.* 73 (2) (2004) 83–89.
5. Galvin K., Callen A. et al., Gravity separation of coarse particles using the Reflux Classifier, *Miner. Eng.* 23 (4) (2010) 339–349.
6. Galvin K., Callen A. et al., Gravity separation using a full-scale Reflux Classifier, *Proceedings, Tenth Australian Coal Preparation Conference Paper H*, 2004.
7. Zigrang D. J., Sylvester N. D. An explicit equation for particle settling velocities in solid–liquid systems, *AIChE J.* 27 (1981) 1043–1044.

8. Liu Dayou Two-phase fluid dynamics. – Beijing, 1993. – 734с.
9. Galvin K., Walton K., Zhou J. How to elutriate particles according to their density, Chem. Eng. Sci. 64 (2009) 2003–2010.
10. Doroodchi E., Fletcher D., Galvin K. Influence of inclined plates on the expansion behaviour of particulate suspensions in a liquid fluidised bed, Chem. Eng. Sci. 59 (2004) 3559–3567.
11. Li Y. F., Li Y., Xia W. C., He C. Y., Zhu R. T. A novel particulate sedimentation model in inclined channels of liquid–solid fluidized bed, Powder Technol. 305 (2017) 764–770.
12. Медников Е. М. Турбулентный перенос и осаждение аэрозолей. – Москва, 1981. – 176 с.

**УДК 628.6**

*Светлана Юрьевна Игнатчик,*  
д-р техн. наук, профессор  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*Ирина Борисовна Ковжаровская,*  
директор департамента схем  
водоснабжения и водоотведения  
и гидравлического моделирования  
(ГУП «Водоканал Санкт-Петербурга»)  
*E-mail: ign0304@yandex.ru,*  
*Kovzharovskaya\_IB@vodokanal.spb.ru*

*Ignatchik Svetlana Yurievna,*  
Dr. Sci. Tech., Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*Irina Borisovna Kovzharovskaya,*  
Director of the Department  
of Water Supply and Sanitation Schemes  
and Hydraulic Modeling  
(SUE Vodokanal of St. Petersburg)  
*E-mail: ign0304@yandex.ru,*  
*Kovzharovskaya\_IB@vodokanal.spb.ru*

**НАПРАВЛЕНИЯ АДАПТАЦИИ  
СЕТЕЙ ВОДООТВЕДЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО  
СТОКА К УСЛОВИЯМ СОВОКУПНОГО ВЛИЯНИЯ  
УРБАНИЗАЦИИ И ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА**

**DIRECTIONS FOR ADAPTING SURFACE RUNOFF  
DRAINAGE NETWORKS TO THE COMBINED EFFECTS  
OF URBANIZATION AND CLIMATE CHANGE**

В Санкт-Петербурге более 96 % эксплуатируемых сетей водоотведения запроектированы до 2012 года, когда применялся понижающий коэффициент  $\beta$ , учитывающий заполнение свободной емкости сети. Это устаревшее решение, не учитывающее современные реалии. Следовательно, регулирующий объем сети при расчетном притоке воды уже использован, и система работает на пределе своих возможностей. В то же время условия эксплуатации таких сетей в большинстве случаев значительно изменились, что приводит к возрастанию гидравлических нагрузок. Это обусловлено двумя основными причинами:

- Уплотнительная застройка [1]: интенсивное жилищное и коммерческое строительство в городе привело к значительному уменьшению доли водонепроницаемых покрытий (зеленых зон, парков, проницаемых дорожных покрытий). В результате, дождевая вода быстрее стекает в канализационную систему, создавая пиковые нагрузки. Этот фактор особенно актуален для исторического центра Санкт-Петербурга, где плотность застройки очень высока.
- Изменение климата [2–4]: наблюдается тенденция к увеличению частоты и интенсивности ливневых осадков. Более сильные и продолжительные дожди перегружают и без того изношенные сети водоотведения, повышая риск

подтоплений и аварийных ситуаций. Это требует разработки и внедрения мер по повышению устойчивости системы к экстремальным погодным явлениям.

Такие сети водоотведения необходимо адаптировать к новым условиям эксплуатации. Одним из наиболее перспективных вариантов адаптации является применение регулирующих резервуаров. Они позволяют аккумулировать избыточный сток во время интенсивных осадков и постепенно сбрасывать его в сеть, снижая пиковые нагрузки. При этом с научной и практической точки зрения представляет интерес комплексное решение задачи по определению оптимальных мест установки и объемов регулирующих резервуаров. Такой подход позволит с минимальными капитальными затратами и без полной замены эксплуатируемых сетей существенно повысить надежность и эффективность системы водоотведения Санкт-Петербурга, минимизируя экологические и экономические риски, связанные с возможными подтоплениями и авариями. Кроме того, необходимо учитывать перспективы дальнейшего развития города и учитывать прогнозируемые изменения климата при планировании модернизации.

*Ключевые слова:* сети водоотведения, гидравлические нагрузки, уплотнительная застройка, изменение климата, регулирующие резервуары, подтопления.

In St. Petersburg, more than 96% of the operated wastewater disposal networks were designed before 2012, when a reduction coefficient  $\beta$  was applied, taking into account the filling of the free network capacity. This is an outdated solution that does not take into account modern realities. Consequently, the regulating volume of the network has already been used at the estimated water inflow, and the system is operating at the limit of its capabilities. At the same time, the operating conditions of such networks have changed significantly in most cases, which leads to increased hydraulic loads. There are two main reasons for this:

- Sealing construction [1]: intensive residential and commercial construction in the city has led to a significant decrease in the proportion of permeable surfaces (green areas, parks, permeable road surfaces). As a result, rainwater drains faster into the sewer system, creating peak loads. This factor is especially relevant for the historical center of St. Petersburg, where the building density is very high.

- Climate change [2–4]: there is a tendency to increase the frequency and intensity of heavy rainfall. Heavier and longer rains overload the already worn-out drainage networks, increasing the risk of flooding and emergency situations. This requires the development and implementation of measures to increase the system's resilience to extreme weather events.

Such drainage networks need to be adapted to the new operating conditions. One of the most promising adaptation options is the use of regulating reservoirs. They allow you to accumulate excess runoff during heavy precipitation and gradually discharge it into the network, reducing peak loads. At the same time, from a scientific and practical point of view, it is of interest to find a comprehensive solu-

tion to the problem of determining the optimal installation locations and volumes of control tanks. This approach will significantly increase the reliability and efficiency of St. Petersburg's wastewater disposal system with minimal capital costs and without completely replacing existing networks, minimizing environmental and economic risks associated with possible flooding and accidents. In addition, it is necessary to take into account the prospects for further development of the city and take into account the projected climate changes when planning modernization.

*Keywords:* drainage networks, hydraulic loads, sealing buildings, climate change, regulating reservoirs, flooding.

Система водоотведения Санкт-Петербурга -комбинированная, включает в себя общесплавные сети водоотведения. Хозяйственно-бытовые, промышленные и ливневые стоки в такой системе перемещаются по одним трубам. Проектирование большинства сетей осуществлялось в соответствии с нормами и стандартами, разработанными более 40 лет назад: НиТУ 141-56, СНиП II-Г.6-62, СНиП II-32-74, СНиП 2.04.03-85, СП 32.13330.2012. В периоды ливневых дождей пропускной способности сетей недостаточно, из-за чего периодически возникают явления выхода воды на поверхность с затоплением территории города в низменных местах.

Устаревшая инфраструктура, рост населения, интенсивная застройка, увеличение доли водонепроницаемых поверхностей и участвовавшие из-за климатических изменений ливневые дожди создают перегрузки в транспортной системе города. В непогоду объем сточных вод может превышать возможности очистных сооружений и сетей водоотведения, вызывая городские наводнения или загрязнение водоемов неочищенными стоками.

В данной ситуации актуальность вопроса адаптации сетей водоотведения к условиям совокупного влияния урбанизации и изменения климата сейчас актуален как никогда. При этом, результаты исследования предметной области показывают, что основными направлениями адаптации общесплавных сетей водоотведения являются:

1. Разделение общесплавных сетей с выделением в отдельную сеть отведения поверхностного стока. В Санкт-Петербурге этот вариант не считается приоритетным по нескольким причинам. Во-первых, его реализация сопряжена с чрезвычайно высокими затратами, особенно в центральных районах города, где такое преобразование прак-

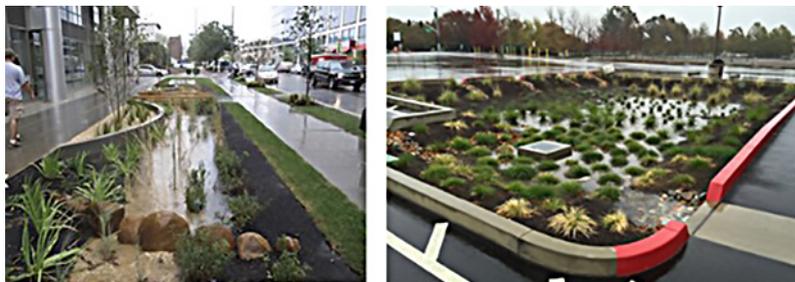
тически невозможно из-за плотной исторической застройки и сложной подземной инфраструктуры. Во-вторых, анализ затрат в других районах показал, что разделение сетей обходится примерно в 7 раз дороже строительства очистных сооружений поверхностного стока. Эта значительная разница в стоимости существенно ограничивает масштабы работ в данном направлении, делая его экономически нецелесообразным в большинстве случаев.

2. Вторым направлением комплексного подхода адаптации сетей водоотведения является их эффективная промывка с минимальными затратами. Традиционные программы промывки, основанные на подходе временного цикла, не учитывающем индивидуальные особенности участков сети и степень их заиливания. Это приводит к снижению производительности сети и нерациональному расходованию ресурсов. По этой причине необходима оптимизация в части определения приоритетности промывки участков сети в условиях ограниченности бюджетов, выделяемых на техническое обслуживание. Для достижения оптимального решения этой проблемы требуется комплексное планирование на весь период, поскольку каждый сегмент канализации может заливаться с разной скоростью, и его состояние в определенный момент времени зависит от решений по промывке, принятых в предыдущие годы. Кроме того, наряду с улучшением оперативного обслуживания, профилактическое обслуживание должно быть целенаправленно сосредоточено на участках с наибольшим риском засорения и наиболее серьезными потенциальными последствиями.

Данное направление работ планируется к применению в условиях Санкт-Петербурга. Однако важно понимать, что засорение – не единственная и даже не основная причина недостаточной пропускной способности сетей. Поэтому, хотя оптимизация промывки и улучшит ситуацию, она не станет панацеей и потребует сочетания с другими мерами, такими как модернизация инфраструктуры и строительство новых очистных сооружений.

3. Применение «зеленых технологий» [5–11], позволяющих снизить гидравлическую нагрузку на сети в периоды выпадения дождей за счет удержания части поверхностного стока, – еще один важный аспект комплексного подхода к адаптации сетей водоотведения. Дождевые сады, проницаемые покрытия, зеленые крыши,

вертикальное озеленение, биоканавы и системы сбора дождевой воды позволяют снизить нагрузку на канализационные сети путем задержки и впитывания части поверхностного стока (см. рис.).



а)

б)

Общий вид биодерживающих систем (БУС):  
а – в городской черте; б – на автомобильной стоянке

Эти технологии имитируют естественные процессы круговорота воды, способствуя ее очистке и уменьшая объемы стоков, поступающих в трубы. Среди преимуществ «зеленых» решений можно выделить снижение риска подтоплений, улучшение качества воздуха, создание более комфортной городской среды и повышение биоразнообразия. Однако в Санкт-Петербурге область применения «зеленых» технологий ограничена высокими уровнями грунтовых вод, что затрудняет их эффективное использование и требует тщательного анализа и выбора подходящих решений.

4. Применение управления в режиме реального времени (*RealTimeControl, RTC*) [12–17], предлагает инновационный подход к оптимизации работы сетей водоотведения. *RTC* позволяет динамически регулировать потоки сточных вод, максимально используя свободную емкость сети и повышая ее пропускную способность, особенно в периоды пиковой нагрузки, например, во время сильных дождей. Это достигается за счет использования автоматизированных систем, контролирующих уровень воды и управляющих работой регулирующих устройств, таких как задвижки и насосы. Однако, несмотря на перспективность, внедрение *RTC* в Санкт-Петербурге сталкивается

с рядом препятствий. Основными ограничивающими факторами являются отсутствие надежных и долговечных регуляторов потоков, способных эффективно функционировать в условиях агрессивной среды, и высокое содержание мусора в сточной воде, что приводит к быстрому засорению и выходу из строя чувствительных элементов системы. Преодоление этих трудностей требует разработки специализированных решений, адаптированных к специфике петербургской канализационной сети;

5. Применение регулирующих резервуаров [18–26], представляет собой эффективный метод увеличения регулирующего объема сетей водоотведения. Строительство дополнительных резервуаров позволяет накапливать избыток сточных вод во время пиковых нагрузок, например, при сильных дождях, и затем постепенно сбрасывать их в канализационную сеть, предотвращая переполнение и подтопления. Популярность таких решений не случайна и объясняется тем, что при регулировании притока на одном из ответвлений сети в нем появляется подпор с возможным выходом воды на поверхность. Для исключения этого эффекта дополнительно устраивают резервуары или ливнеспуски [28]. Однако следует отметить, что при достаточной аккумулирующей емкости самого ответвления, регулирование может осуществляться и без дополнительных резервуаров и выпусков.

Примером регулирования притока сточных вод в сочетании с резервуарами является система водоотведения Барселоны [28]. Регулирование осуществляется с применением устройств для перенаправления потоков (*redirectiongate*) и их удерживания (*retentiongate*). Такой подход весьма эффективен и позволяет избежать подпора и выхода воды на поверхность. Тем не менее, системы регулирования притока, даже в сочетании с резервуарами, имеют свои недостатки. Как показывает практика, их надежность может быть ограничена, особенно в сложных условиях. В работе [27] отмечается, что «глобальное оптимальное управление канализационной сетью подвержено сбоям», связанным с неисправностью датчиков (дождемеров и уровнемеров) и исполнительных механизмов (заслонок и насосов), особенно во время интенсивных осадков. Это требует применения дополнительных мер по обеспечению надежности и отказоустойчивости таких систем.

В результате исследования предметной области можно сделать вывод о том, что в условиях Санкт-Петербурга, с учетом высокой плотности застройки, высокого уровня грунтовых вод и специфики существующей инфраструктуры, наиболее универсальным направлением адаптации общесплавных сетей водоотведения к условиям совокупного влияния урбанизации и изменения климата является применение регулирующих резервуаров. Они позволяют эффективно управлять пиковыми нагрузками на сеть, вызванными интенсивными осадками, и минимизировать риск подтоплений. Однако, даже этот подход требует тщательного проектирования, учитывающего гидрологические особенности города и интеграции резервуаров в существующую систему.

Важно отметить, что универсальность регулирующих резервуаров не исключает необходимости применения других методов адаптации, таких как локальные «зеленые» решения в районах с подходящими условиями и оптимизация работы сети за счет современных методов мониторинга и моделирования. В целом, адаптация систем водоотведения к изменяющимся условиям – сложная задача, требующая комплексного подхода, учета местных особенностей и постоянного совершенствования технологий. Дальнейшие исследования должны быть направлены на разработку инновационных решений, адаптированных к специфике Санкт-Петербурга, таких как усовершенствованные системы управления ливневым стоком, адаптированные «зеленые» технологии и повышение надежности оборудования, а также на повышение надежности и эффективности существующих методов. Это позволит обеспечить безопасность и устойчивое развитие города в условиях изменяющегося климата.

### Литература

1. Волков С. Н., Лукьянчук М. Ю., Житенев А. И. и др. Системы отведения поверхностного стока: проблемы и решения // Водоснабжение и санитарная техника. 2022. № 7. С. 53–60. DOI: 10.35776/VST.2022.07.07.
2. Игнатчик В. С., Игнатчик С. Ю., Кузнецова Н. В., Феськова А. Я. Влияние изменений климата на гидравлические режимы систем отведения поверхностного стока // Вода и экология: проблемы и решения. 2020. № 4(84). С. 50–57.
3. Волков С. Н., Житенев А. И., Рублевская О. Н. и др. Особенности оценки расчетных интенсивностей дождей с учетом экстремальных ливней //

Водоснабжение и санитарная техника. 2021. № 7. С. 50–55. DOI: 10.35776/VST.2021.07.07.

4. Третий оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. СПб. : Научное издание, 2022. 124 с.

5. Bioretention Manual. Prince George's County, MD: Environmental Services Division, Department of Environmental Resources, 2007. 206 p. URL: [https://www.aacounty.org/departments/public-works/highways/forms-and-publications/RG\\_Bioretention\\_PG%20CO.pdf](https://www.aacounty.org/departments/public-works/highways/forms-and-publications/RG_Bioretention_PG%20CO.pdf) (дата обращения: 20.12.2022).

6. *Dagenais D., Brisson J., Fletcher T. D.* The role of plants in bioretention systems; does the science underpin current guidance? // *Ecological Engineering*. 2018. Vol. 120. P. 532–545.

7. *Roy-Poirier A., Champagne P., Filion Y.* Review of bioretention system research and design: Past, present, and future // *Journal of Environmental Engineering*. 2010. Vol. 136. P. 878–889.

8. *Li J., Davis A. P.* A unified look at phosphorus treatment using bioretention // *Water Research*. 2016. Vol. 90. P. 141–155.

9. *Yang Y., Chui T. F. M.* Optimizing surface and contributing areas of bioretention cells for stormwater runoff quality and quantity management // *Journal of Environmental Planning and Management*. 2018. Vol. 206. P. 1090–1103.

10. *Ellis J. B.* Sustainable surface water management and green infrastructure in UK urban catchment planning // *Journal of Environmental Planning and Management*. 2013. Vol. 56. P. 24–41.

11. *Kazemi F., Beecham S., Gibbs J., Clay R.* Factors affecting terrestrial invertebrate diversity in bioretention basins in an Australian urban environment // *Landscape and Urban Planning*. 2009. Vol. 92. P. 304–313.

12. *Livesley S., McPherson E. G., Calfapietra C.* The urban forest and ecosystem services: Impacts on urban water, heat, and pollution cycles at the tree, street, and city scale // *Journal of Environmental Quality*. 2016. Vol. 45. P. 119–124.

13. *Loucks E. D., Locke E. F., Heinz S. R., Vitasovic Z. C.* Real-Time Control Strategy for Operating the Milwaukee Metropolitan Sewerage District (MMSD) Conveyance and Storage System // *Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management* / Ed. by G. Sehlke et al. Salt Lake City, UT: Environmental and Water Resources Institute and American Society of Civil Engineers, 2004.

14. *Pleau M., Colas H., Lavalle'e P., Pelletier G., Bonin R.* Global optimal real-time control of the Quebec urban drainage system // *Environmental Modelling & Software*. 2005. Vol. 20. P. 401–413.

15. *Vanrolleghem P. A., Benedetti L., Meirlaen J.* Modelling and real-time control of the integrated wastewater system // *Environmental Modelling & Software*. 2005. Vol. 20. P. 427–442.

16. *Vázquez J., François M., Gilbert D.* Real-time management of a sewage system: verification of the optimality and applicability of graphical linear programming compared to mixed linear programming // *Revue des Sciences de l'Eau*. 2003. Vol. 16. № 4. P. 425–442.
17. *Weyand M.* Real-time control in combined sewer systems in Germany – some case studies // *Urban Water Journal*. 2002. Vol. 4. P. 347–354.
18. Геоновости. Шестнадцать зеленых мегаполисов // Terrasoft. URL: <https://geonovosti.terratech.ru/ecology/shestnadsat-zelenykh-megapolisov/> (дата обращения: 29.11.2024)
19. *Li L., Pussella P.* Is Colombo city, Sri Lanka secured for urban green space standards? // *Applied Ecology and Environmental Research*. 2017. Vol. 15. P. 1789–1799.
20. *Wustemann H., Kalisch D., Kolbe J.* Access to urban green space and environmental inequalities in Germany // *Landscape and Urban Planning*. 2017. Vol. 164. P. 124–131.
21. *Russo A., Cirella G.* Modern Compact Cities: How Much Greenery Do We Need? // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. 2018. Vol. 15. P. 2180.
22. *Kim M., Rupprecht C., Furuya K.* Residents' Perception of Informal Green Space – A Case Study of Ichikawa City, Japan // *Land*. 2018. Vol. 7. P. 102.
23. *Maryanti M., Khadijah H., Uzair M., Megat Mohd Ghazali M.* The urban green space provision using the standards approach: issues and challenges of its implementation in Malaysia // *Transactions on Ecology and Environment*. 2016. Vol. 210. P. 369–379. DOI: 10.2495/SDP160311.
24. *Kabisch N., Strohbach M., Haase D., Kronenberg J.* Urban green space availability in European cities // *Ecological Indicators*. 2016. Vol. 70. P. 586–596.
25. *Coşkun Ö.* Green space local government policy the cases of Kartal and Sariyer in Istanbul. Ankara: Middle East Technical University, 2004. 164 p. (Master Thesis).
26. *Волков С. Н., Лукьянчук М. Ю., Жукова А. Г.* и др. Обоснование оптимального варианта адаптации системы водоотведения Санкт-Петербурга к условиям совокупного влияния урбанизации и изменения климата. Часть 1. Программа – методика обоснования оптимального варианта // *Водоснабжение и санитарная техника*. 2025. № 3. С. 44–50.
27. *Marinaki M., Papageorgiou M.* Fault-Tolerant Optimal Control of Sewer Networks: Barcelona Case Study // *ResearchGate*. URL: [https://www.researchgate.net/publication/229614548\\_Fault-Tolerant\\_Optimal\\_Control\\_of\\_Sewer\\_Networks\\_Barcelona\\_Case\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/229614548_Fault-Tolerant_Optimal_Control_of_Sewer_Networks_Barcelona_Case_Study) (дата обращения: 29.11.2024).
28. *Wu H., Huang G., Meng Q., Zhang M., Li L.* Deep Tunnel for Regulating Combined Sewer Overflow Pollution and Flood Disaster: A Case Study in Guangzhou City, China // *Water*. 2016. Vol. 8. № 8. P. 329.

**УДК 628.1**

*Дарья Николаевна Куликова,*  
магистрант  
*Алексей Петрович Авсюкевич,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*E-mail: dari.culickowa@yandex.ru,*  
*aap.ecoprom@gmail.com*

*Darya Nikolaevna Kulikova,*  
Master's degree student  
*Alexey Petrovich Avsyukevich,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*E-mail: dari.culickowa@yandex.ru,*  
*aap.ecoprom@gmail.com*

**ВОДОЗАБОР ПОДЗЕМНЫХ ВОД. ПОДБОР  
ДИАМЕТРОВ СКВАЖИННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ  
ДЛЯ УСТОЙЧИВОЙ РАБОТЫ НАСОСОВ**

**GROUNDWATER INTAKE. SELECTION OF BOREHOLE  
PIPELINE DIAMETERS FOR STABLE PUMP OPERATION**

Данная работа посвящена вопросам проектирования скважинных водозаборов с акцентом на рекомендации подбора диаметров трубопроводов и обеспечение стабильной работы системы при параллельном подключении нескольких скважин к общему водоводу. Рассматриваются основные факторы, влияющие на гидравлический расчет трубопроводов. Особое внимание уделяется технико-экономическим аспектам выбора диаметров труб, а также требованиям к работе насосного оборудования и дебиту скважин. Предложен метод подбора диаметров трубопроводов, основанный на принципе равенства сопротивлений участков до точки схода потоков, что обеспечивает стабильную работу системы при различных режимах эксплуатации. Приведены результаты математического моделирования, подтверждающие эффективность предложенного подхода. Полученные выводы позволяют оптимизировать проектирование скважинных водозаборов, обеспечивая их надежность, энергоэффективность и соответствие нормативным требованиям.

*Ключевые слова:* подбор диаметров трубопроводов, скважинные водозаборы, скважинные трубопроводы, дебит скважины, параллельная работа насосов, рабочая зона насоса, гидравлический расчет.

This work is devoted to the design of borehole intakes with an emphasis on recommendations for selecting pipeline diameters and ensuring stable system operation when several wells are connected in parallel to a common water pipeline. The main factors influencing the hydraulic calculation of pipelines are considered. Special attention is paid to the technical and economic aspects of choosing pipe diameters,

as well as the requirements for pumping equipment and well discharge. A method for selecting pipeline diameters is proposed based on the principle of equality of the resistances of the sections up to the point of flow convergence, which ensures stable operation of the system under various operating conditions. The results of mathematical modeling confirming the effectiveness of the proposed approach are presented. The findings make it possible to optimize the design of borehole intakes, ensuring their reliability, energy efficiency and compliance with regulatory requirements.

*Keywords:* selection of pipeline diameters, borehole water intakes, borehole pipelines, well flow rate, parallel operation of pumps, pump working area, hydraulic calculation.

Скважинные водозаборы представляют собой важнейшую инженерную систему, обеспечивающую подачу воды из водоносных горизонтов для удовлетворения потребностей промышленности, сельского хозяйства и бытовых нужд. Обвязка скважины – это комплекс мероприятий по соединению скважины с внешними трубопроводами и технологическим оборудованием, включая насосные станции, резервуары и распределительные сети. Одним из ключевых этапов проектирования является правильный выбор диаметров трубопроводов, основанный на гидравлических и технико-экономических расчетах [1].

Гидравлический расчет трубопроводов играет фундаментальную роль в проектировании скважинных водозаборов. Основной задачей данного расчета является определение потерь напора в трубопроводе, которые зависят от следующих факторов:

1. скорости движения воды;
2. длины трубопроводов;
3. геометрических характеристик труб (диаметр, шероховатость стенок);
4. физических свойств перекачиваемой жидкости (плотность, вязкость).

Потери напора состоят из двух компонентов: потери по длине (внутри трубы) и местные потери (в местах изменений направления потока, переходов, фитингов и др.). Для расчета потерь по длине используется формула Дарси–Вейсбаха [2]:

$$h_{\text{дл}} = \lambda \cdot \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2 \cdot g}$$

Определение диаметра трубопроводов для скважинных водозаборов является ключевой задачей при проектировании систем водоснабжения. Особое внимание уделяется работе нескольких скважин на общий водовод, где необходимо обеспечить стабильность работы насосного оборудования [3]. Классический подход определения диаметров трубопроводов основывается на рекомендуемой экономической скорости потока.

При подключении нескольких скважин к общему водоводу возникают сложности, связанные с необходимостью обеспечения стабильной работы всей системы.

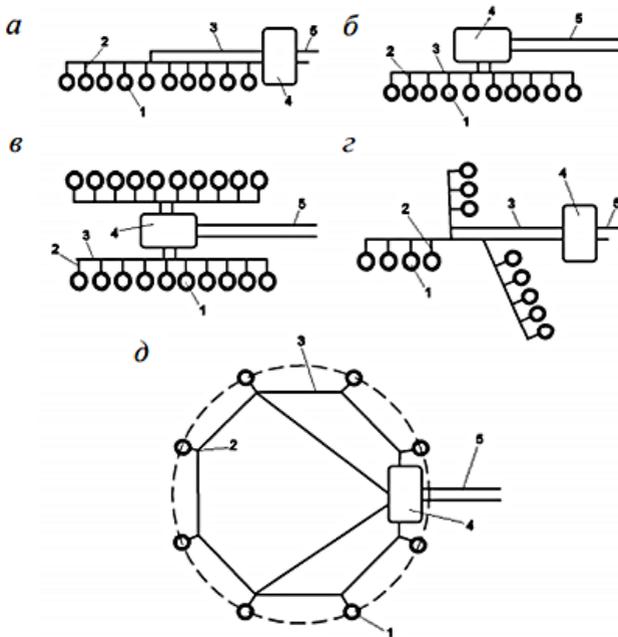


Рис. 1. Схемы скважинных водозаборов: *а, б* – линейный ряд скважин; *в* – площадная схема водозаборов с двумя рядами скважин; *г* – произвольная схема расположения скважин; *д* – кольцевая схема расположения скважин; *1* – водозаборные скважины с насосными станциями первого подъема; *2* – отводной трубопровод; *3* – сборный водовод; *4* – головные сооружения; *5* – водовод

Основные требования включают:

- Требования к дебету скважины: Насос для скважины необходимо подбирать таким образом, чтобы дебет скважины превышал номинальную подачу насоса не менее чем на 25 % [4].
- Требования к работе насосов: Работа насосов должна находиться в пределах рабочей зоны. Эксплуатация насоса (агрегата) за пределами рабочей зоне не рекомендуется из-за снижения энергетических показателей и показателей надежности [5].

Выполнение этих требований существенно зависит от схемного решения обвязки скважинного водозабора и подбора правильных диаметров.

Схема размещения скважин может быть линейной или площадной, в зависимости от гидрогеологические условий и предоставленного участка.

Система водоснабжения из подземных вод состоит из водозаборных скважин с насосными станциями, сборного водовода, сооружения водоподготовки, резервуара чистой воды, насосной станция первого подъема, водонапорной башни.

Схемное расположение отдельных сооружений скважинных водозаборов может быть подразделено на схемы, показанные на рис. 1 [6].

Скважины, как правило, работают на общий трубопровод, расположены от него на разных расстояниях, что существенно может влиять на условия работы насосов. Кроме того, существуют разные режимы работы системы водозабора ввиду включения или выключения резервных скважин в разных местах водозабора.

Существующие рекомендации по определению диаметров как правило руководствуясь только классическим подходом определения диаметра участков трубопровода, согласно рекомендациям [8]. Это затрудняет работу проектных организаций, вынужденных выполнять большой объем поверочных расчетов. Чтобы выполнить требования к работе скважинного водозабора изложенные выше предлагается следующий способ решения задачи. Покажем на простом примере. Рассмотрим водозабор подземных вод, состоящий из 4 скважин (три рабочих и одна резервная, в соответствии с СП 31.13330.2021). Скважины расположены на площади в соответствии со схемным решением показанном на рис. 2 (в масштабе 1:20000). Длины скважин-

ных трубопроводов до точки схода потоков  $L_1 = 200$  м,  $L_2 = 500$  м,  $L_3 = 1100$  м,  $L_{рез} = 500$  м, длина водовода  $L_{вод} = 1000$  м.

Требуемая высота подъема  $H_{ст} = 57$  м.

Необходимая общая подача воды  $Q_{общ} = 27,7$  л/с ( $100$  м<sup>3</sup>/ч), подобрали насосы марки ЭЦВ 8-40-90,  $S_n = 0,1689$  (при  $Q$  в л/с).

Рабочая зона насоса ЭЦВ 8-40-90 находится в пределах от  $28$  м<sup>3</sup>/ч ( $7,7$  л/с) до  $52$  м<sup>3</sup>/ч ( $14,4$  л/с)

Дебит скважины  $55$  м<sup>3</sup>/ч, следовательно верхняя граница для скважинного насоса  $41,25$  м<sup>3</sup>/ч ( $11,45$  л/с).

Соответственно насос должен работать в диапазоне от  $28$  м<sup>3</sup>/ч ( $7,7$  л/с) до  $41,25$  м<sup>3</sup>/ч ( $11,45$  л/с)

В рассматриваемом случае приняты следующие условия:

- а) скважин одинаковый динамический уровень;
- б) отсутствие взаимного влияния друг на друга.

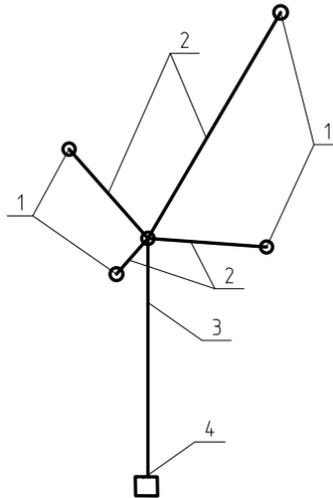


Рис. 2. Схемное решение площадного водозабора:  
 1 – водозаборные скважины; 2 – скважинный трубопровод;  
 3 – сборный водовод; 4 – приемный резервуар

Данную схему можно рассматривать как параллельную работу нескольких насосов на общий водовод.

Для обеспечения стабильной работы водозабора при параллельном подключении нескольких скважин необходимо выполнить следующие условия:

- Расход каждой скважины должен находиться в пределах допустимого диапазона.
- Характеристики насосов должны совпадать, чтобы обеспечить одинаковый рабочий режим. [7]

Согласно рекомендаций [8] для скважинных водозаборов допустимая скорость потока обычно составляет 0,7–3 м/с. Если предварительно известен расход воды, можно выбрать соответствующий диаметр трубопровода. Исходя из технико-экономического обоснования, используя таблицы Шевелева [10] подберем диаметры для скважинного трубопровода (трубы из стали).

При  $Q = 11,1$  л/с ( $40$  м<sup>3</sup>/ч) выберем среднюю скорость  $v = 1,55$  м/с  $1000i = 55$  м диаметры для трубопровода  $\varnothing 80$ .

При  $Q = 33,3$  л/с ( $120$  м<sup>3</sup>/ч) выберем среднюю скорость  $v = 1,71$  м/с  $1000i = 34,4$  м диаметры для водовода  $\varnothing 150$ .

Проверим правильно ли запроектирован водозабор. Сделаем поверочный расчет с помощью математической модели, выполненной в программе *EPANET* (расчет и моделирование напорных водораспределительных сетей) (рис. 3).

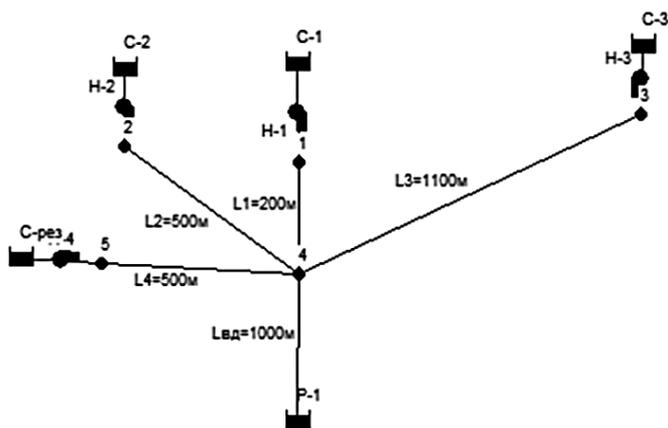


Рис. 3. Расчетная схема водозабора подземных вод

Полученные результаты расчета приведены в табл. 1

Таблица 1

**Основные данные гидравлического расчета  
водозабора подземных вод**

Имя трубопровода	Длина м	Диаметр мм	Расход МЗЧ	Скорость МС
Трубопровод L1=200м	200	80	35.91	1.98
Трубопровод L2=500м	500	80	27.63	1.53
Трубопровод L3=1100м	1100	80	20.24	1.12
Трубопровод Lрез=500м	500	80	0.00	0.00
Трубопровод Lвд=1000м	1000	150	83.78	1.32
Насос Н-1	#N/A	#N/A	35.91	0.00
Насос Н-3	#N/A	#N/A	20.24	0.00
Насос Н-2	#N/A	#N/A	27.63	0.00
Насос Н-рез	#N/A	#N/A	0.00	0.00

Согласно данным полученным из каталога насосов ЭЦВ рабочая зона выбранного нами насоса составляет от 28 м<sup>3</sup>/ч (7,7 л/с) до 41,25 м<sup>3</sup>/ч (11,45 л/с) [4]. Можем обратить внимание, что скорость в трубопроводах соответствует рекомендуемым [8], **однако расход подаваемый насосами Н-3 и Н-2 находится за пределами рабочей зоны, что недопустимо.**

Рассмотрим вариант с подключением резервного насоса (табл. 2).

При отключении насоса Н-3 и включении резервного Н<sub>рез</sub> скорость в трубопроводах соответствует рекомендуемой, однако расход подаваемый насосами Н-2 и Н-4 **находится за пределами рабочей зоны, что недопустимо.**

Для обеспечения стабильной работы водозабора воспользуемся принципом параллельной работы.

Параллельной работой насосов называется одновременная подача перекачиваемой жидкости несколькими насосами в общий напорный водовод [10].

Таблица 2

**Данные гидравлического расчета водозабора подземных вод  
с переключением на резервный насос**

Имя трубопровода	Длина м	Диаметр мм	Расход МЗЧ	Скорость МС
Трубопровод L1=200м	200	80	34.91	1.93
Трубопровод L2=500м	500	80	26.85	1.48
Трубопровод L3=1100м	1100	80	0.00	0.00
Трубопровод Lрез=500м	500	80	26.85	1.48
Трубопровод Lвд=1000м	1000	150	88.62	1.39
Насос Н-1	#N/A	#N/A	34.91	0.00
Насос Н-3	#N/A	#N/A	0.00	0.00
Насос Н-2	#N/A	#N/A	26.85	0.00
Насос Н-рез	#N/A	#N/A	26.85	0.00

При совместной работе нескольких насосов при параллельном подключении, могут быть использованы насосные агрегаты как с одинаковыми, так и с разными характеристиками. При этом для нашей схемы стабильная работа будет достигаться, если приведенные характеристики (суммарная характеристика) насоса и скважинного трубопровода до точки схода потоков будут равны. Таким образом, при одинаковых характеристиках насосов, сопротивления трубопроводов до схода потоков тоже должны быть равны. Для этого подберем диаметры, определив удельное сопротивление с помощью таблиц Шевелева при  $Q_{\text{скв}} = 11,1$  л/с ( $40$  м<sup>3</sup>/ч), далее на различных участках скважинного трубопровода определим их сопротивлением с учетом длины каждого участка.

$$A_0 = \frac{h}{Q_{\text{скв}}^2} \quad (1)$$

где  $A_0$  – удельное сопротивление;  $h$  – потери напора на участке ( $1000i$  по таб. Шевелева);  $Q_{\text{скв}}$  – расход

$$S_{\text{тр}} = A_0 \cdot L \quad (2)$$

где  $S_{\text{тр}}$  – сопротивление трубопровода;  $L_{\text{тр}}$  – длина трубопровода.

Подбираем диаметры с учетом удельного сопротивления и длин трубопроводов с помощью формул (1) и (2).  $S_1 = S_2 = S_3 = S_{рез}$

При  $S_1 = 0,08$  и  $L_1 = 200$ м принимаем диаметр  $D_1 = 80$

При  $S_2 = 0,09$  и  $L_2 = 500$ м принимаем диаметр  $D_2 = 100$

При  $S_3 = 0,08$  и  $L_3 = 1100$ м принимаем диаметр  $D_3 = 125$

При  $S_{рез} = 0,09$  и  $L_{рез} = 500$ м принимаем диаметр  $D_4 = 100$

Таблица 3

**Данные гидравлического расчета водозабора подземных вод  
с разными диаметрами**

Имя трубопровода	Длина м	Диаметр мм	Расход МЗЧ	Скорость МС
Трубопровод L1=200м	200	80	32.11	1.77
Трубопровод L2=500м	500	100	33.30	1.18
Трубопровод L3=1100м	1100	125	35.16	0.80
Трубопровод Lрез=500м	500	100	0.00	0.00
Трубопровод Lвд=1000м	1000	150	100.57	1.58
Насос Н-1	#N/A	#N/A	32.11	0.00
Насос Н-3	#N/A	#N/A	35.16	0.00
Насос Н-2	#N/A	#N/A	33.30	0.00
Насос Нрез	#N/A	#N/A	0.00	0.00

Полученный результаты проверим моделированием (табл. 3).

При данном подборе диаметров расход насосов находится в рабочем диапазоне (от 28 м<sup>3</sup>/ч (7,7 л/с) до 41,25 м<sup>3</sup>/ч (11,45 л/с)). Для проверки работы системы смоделируем ситуацию с отключением одного насоса (табл. 4 и табл. 5).

Таблица 4

**Данные гидравлического расчета водозабора подземных вод  
с разными диаметрами с подключением резервного насоса**

Имя трубопровода	Длина м	Диаметр мм	Расход МЗЧ	Скорость МС
Трубопровод L1=200м	200	80	32.37	1.79
Трубопровод L2=500м	500	100	33.57	1.19
Трубопровод L3=1100м	1100	125	0.00	0.00
Трубопровод Lрез=500м	500	100	33.57	1.19
Трубопровод Lвд=1000м	1000	150	99.52	1.56
Насос Н-1	#N/A	#N/A	32.37	0.00
Насос Н-3	#N/A	#N/A	0.00	0.00
Насос Н-2	#N/A	#N/A	33.57	0.00
Насос Нрез	#N/A	#N/A	33.57	0.00

Таблица 5

**Данные гидравлического расчета водозабора подземных вод  
с разными диаметрами с подключением резервного насоса**

Имя трубопровода	Длина м	Диаметр мм	Расход МЗЧ	Скорость МС
Трубопровод L1=200м	200	80	0.00	0.00
Трубопровод L2=500м	500	100	33.12	1.17
Трубопровод L3=1100м	1100	125	34.98	0.79
Трубопровод Lрез=500м	500	100	33.12	1.17
Трубопровод Lвд=1000м	1000	150	101.22	1.59
Насос Н-1	#N/A	#N/A	0.00	0.00
Насос Н-3	#N/A	#N/A	34.98	0.00
Насос Н-2	#N/A	#N/A	33.12	0.00
Насос Нрез	#N/A	#N/A	33.12	0.00

В случае с отключением одного насоса система работает стабильно, расход насосов находится в пределах рабочего диапазона (от 28 м<sup>3</sup>/ч (7,7 л/с) до 41,25 м<sup>3</sup>/ч (11,45 л/с)).

**Выводы:**

1. Предполагаемый способ подбора диаметров скважинных трубопроводов обеспечивает стабильную работу насосов водозабора подземных вод.

2. Для обеспечения равных условий работы насосов необходимо, чтобы при их параллельной работе суммарное сопротивление насосов и трубопроводов до точки схода потоков должны быть равны.

3. При выборе схемного решения обвязки водозабора необходим системный подход. Должны учитываться как требования к рабочей зоне насоса, подбора диаметров трубопроводов, так и требования по работе скважин. В результате такого подхода система в комплексе будет работать стабильно и надежно.

**Литература**

1. СП 31.13330.2021 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения СНиП 2.04.02-84\* Свод правил от 27.12.2021 N31.13330.2021, Применяется с 28.01.2022 взамен СП31.13330.2012. URL: <https://www.fkr-spb.ru/upload/iblock/52e/39qm037smbcw7bj6g8vqsrq1qufp1wd.pdf>

2. *Кирсанов М. Н.* Гидравлика. – М. : Высшая школа, 1985.

3. *Александров В. А., Беляев Ю. В.* Гидравлика. – М. : Высшая школа, 2015.

4. Каталог ЭЦВ Скважинные насосы URL: Каталог LIVNASOS – купить профессиональное оборудование в России и СНГ с доставкой.

5. Насосы центробежные, секционные, питательные ЦНСп 2,5 и агрегатных на их основе, Руководство по эксплуатации H49.931.00.00.000 РЭ. <https://www.hms-livgidromash.ru/upload/iblock/788/788dbd657d87d19ec041c0f2655a7538.pdf>

6. Скважинные водозаборы. Правила проектирования. ТКП 45-4.01-199–2010. – Минск : М-во стр-ва и архитектуры, 2011.

7. *Кузнецов С. Л.* Насосные станции и водопроводы. – М. : Стройиздат, 2013.

8. СНиП 2.04.02-84 Водоснабжение. Наружные сети и сооружения от 01.01.1985. [https://www.flamax.ru/upload/snip\\_2.04.02-84.pdf](https://www.flamax.ru/upload/snip_2.04.02-84.pdf)

9. *Шейко А. М.* Расчет водозаборных сооружений из поверхностных и подземных источников. Минск : БНТУ, 2014.

10. *Шевелев Ф. А., Шевелев А. Ф.* Таблицы для гидравлического расчета водопроводных труб: Справ. пособие. – М. : Стройиздат, 1995.

11. *Карелин А. Я., Минаев А. В.* Насосы и насосные станции: Учеб. для вузов. – 2-е изд. Перераб. И доп. – М. : Стройиздат, 1985.

12. ГОСТ Р 54809-2011. Насосы центробежные. Общие требования. М. : Стандартинформ, 2011. URL: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ad2/4293795801/pdf/>

13. *Васильев В. М.* Насосы и насосные станции: Учеб. пособие / В. М. Васильев, С. В. Федоров, А. В. Кудрявцев; СПбГАСУ. – Спб., 2017. – Ч. 1. 131 с.
14. *Авсюкевич А. П.* Повышение эффективности напорных систем водоснабжения с несколькими водопитателями: автореферат кан. техн. наук: Вологда, 2000.
15. *Абрамов Н. Н.* Водоснабжение. Учебник для вузов. / Изд. 2-е, перераб. и доп. М., Стройиздат, 1974. 480 с.
16. *Матвиенко А. В., Томилова Б. И., Фоканова М. И.* Расчет совместной работы насосов при параллельном подключении: Известия ТулГУ. Технические науки. 2019. Вып. 12.
17. Совместная работа нескольких насосов на общую систему, 2023. <https://uznasosmash.com/blog/sovmešnaya-rabota-neskolkih-nasosov-na-objyusistemu.html/>
18. *Лобачев П. В.* Насосы и насосные станции: Учебник для техникумов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1983. – 191 с.
19. *Зацепин В. Н.* Курсовое и дипломное проектирование водопроводных и канализационных сетей и сооружений / Учеб. пособие для техникумов. – Л. : Стройиздат, 1973. – 215 с.
20. *Николадзе Г. И.* Водоснабжение. – М. : Стройиздат, 1989. – 496 с.
21. *Абрамов Н. Н.* Теория и методика расчета систем подачи и распределения воды. – М. : Стройиздат, 1972. – 286 с.
22. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод: Учебное пособие / Под ред. С. П. Стесина. – М. : ИЦ «Академия», 2005.

**УДК 628.1**

*Сергей Сергеевич Косицкий,*

старший оператор

*Михаил Алексеевич Заболотских,*

старший оператор

(Научная рота военно-системных исследований материально-технического обеспечения Вооруженных Сил Российской Федерации)

*Алексей Евгеньевич Руденко,*

канд. экон. наук, начальник

26-го научно-исследовательского отдела

Военно-исследовательский институт

военно-системных исследований

материально-технического обеспечения

Вооруженных Сил Российской Федерации)

*E-mail: sergey\_kositskey2000@mail.ru,*

*maz-2001@yandex.ru,*

*rudenko.ru.76@mail.ru*

*Sergey Sergeevich Kositskiy,*

senior operator

*Mikhail Alekseevich Zabolotskikh,*

senior operator

(Scientific Company for military-system research of logistics of the Armed Forces of the Russian Federation)

*Aleksey Evgenievich Rudenko,*

PhD of Sci. Ec., Head of the 26<sup>th</sup>

Scientific Research Department

(Scientific Research Institute

of Military System

of Logistics of the Armed Forces

of the Russian Federation)

*E-mail: sergey\_kositskey2000@mail.ru,*

*maz-2001@yandex.ru,*

*rudenko.ru.76@mail.ru*

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ УРБАНИЗАЦИИ  
В КОНТЕКСТЕ «ЗЕЛЕННОЙ АРХИТЕКТУРЫ»  
И ЛАНДШАФТНОГО ДИЗАЙНА**

**ENVIRONMENTAL ASPECTS OF URBANIZATION  
IN THE CONTEXT OF «GREEN ARCHITECTURE»  
AND LANDSCAPE DESIGN**

В статье рассматривается вопрос формирования городской среды. В ней проанализированы характерные черты исторической застройки и ее влияние на экологию. Обозначены принципы застройки с позиции влияния на экологические характеристики среды. Возможности влияния озеленения на окружающую среду, нейтрализация и фильтрация вредного воздействия различных аспектов загрязнения: шумового, воздушного. Также рассматривается возможность интеграции озеленения в плотную городскую застройку в виде «зеленых» зданий и «зеленой архитектуры». Основными выводами исследования является необходимость создания организованной и согласованной системы озеленения, с учетом ограниченного пространства в плотной исторической застройке.

*Ключевые слова:* урбанизация, урбанизованная среда, «зеленая архитектура», экосистема, зеленые насаждения, биосфера.

The article discusses the issue of the formation of the urban environment. It analyzes the characteristic features of historical buildings and their impact on the environment. The principles of building are considered from the perspective of influencing the environmental characteristics of the environment. The possibility of greening's impact on the environment, neutralization and filtration of the harmful effects of various aspects of pollution: noise, air. The possibility of integrating landscaping into dense urban development in the form of "green" buildings and "green architecture" is being considered. The main conclusions of the study are the indispensability of creating an organized and coordinated landscaping system, taking into account the limited space in a dense historical building.

*Keywords:* urbanization, urbanized environment, green architecture, ecosystem, green spaces, biosphere.

Процесс урбанизации в России идет очень активно в течение последних полутора столетий, поводом для этого изначально послужила промышленная революция, в результате которой в города из сел пошел поток переселенцев. Сейчас идет постиндустриальная эпоха, но тенденция стягивания населения в крупные мегаполисы остается неизменной, за счет большего количества рабочих мест, образовательных учреждений и возможностей роста, чем в сельских поселениях [1].

Вследствии быстрого роста населения возникла необходимость в обеспечении жилья, а поскольку обеспечить эффективное использование территории за счет высокой этажности жилых зданий было невозможно в XIX начале XX веков, то плотное расположение жилой застройки являлось наиболее правильным выходом. Кроме того, в контексте города Санкт-Петербурга строительство высотных зданий было запрещено, в связи с высотным регламентом 1844 года, ограничивающим высоту зданий 23 метрами.

Быстрое расширение городов приводят к изменениям природных экосистем, увеличению загрязнения воздуха, воды, почвы, увеличению светового загрязнения, все это влияет на изменение климатических условий. Вопросы устойчивого развития и сохранения природных ресурсов становится все более актуальными [2].

Экологическое состояние окружающей среды и плотность городской застройки находятся в прямой зависимости. Увеличение объектов городской, промышленной инфраструктуры вызывает увеличение экологической нагрузки на биосферу, а жители теряют доступную природную составляющую среды [3].

Наиболее уязвимыми территориями в городе являются те, что расположены вблизи транспортных магистралей и в районах плотной исторической застройки. На данных объектах отмечается наиболее высокий уровень воздушного, светового, шумового загрязнения, образуются «острова тепла» [4–5].

Наименьшая концентрация вредных веществ наблюдается в природных и хорошо озелененных участках городской среды, так как обилие зеленых насаждений фильтрует воздух и удерживает мелкие частицы пыли. Растительность, в первую очередь деревья и кустарники, поглощают звуковые волны, чем снижают уровень шума. В городах используется множество материалов, которые отражают звуковые волны например: асфальт, бетон, стекло, а листва зеленых насаждений поглощает и рассеивает звук снижая его отражение. В условиях городской среды использование зеленых крыш и вертикальных садов также могут служить барьером для звуковых волн и нейтрализовать вредное шумовое воздействие [6].

Озеленение одно из основных способов нормализации гигиенических и климатических условий окружающей среды. От типов посадок зеленых насаждений зависит количественная характеристика снижения загрязнения:

- однорядная посадка деревьев шириной защитной полосы 5 м. снижает уровень загрязнения на 5–10 %;
- однорядная посадка кустарников шириной защитной полосы 5 м. снижает уровень загрязнения на 7–10 %;
- двурядная посадка деревьев высотой от 10 до 18 м. и шириной полосы 10 м. снижает уровень загрязнения на 25–30 % [7].

Если рассматривать современную городскую среду Санкт-Петербурга, можно заметить недостаток зеленых насаждений, буферных и рекреационных зон. Этот дефицит проявляется как на общественных территориях, так и в придомовых территориях центральных районов города, такие как Адмиралтейский, Центральный, Василеостровский, Петроградский. Такого дефицита в районах более поздней застройки: Кировского, Московского, Выборгского, Невского и т.д. значительно меньше в связи с плановой экономикой и. В этих районах жилые кварталы проектировались с учетом зеленых насаждений во дворах, вдоль улиц, а также обилие парков и скверов.

Вопрос озеленения городских пространств активно начал развиваться еще в Советской России и даже после войны в 1945–1946 годах в городах РСФСР было высажено 6,4 млн. деревьев и 7,5 млн. кустарников ссылка. Сейчас в России общая тенденция на создание комфортной городской среды. Федеральный проект ФКГС (формирование комфортной городской среды) занимается благоустройством в городах придомовых территорий, парков, скверов. Но, ситуация в центральной части города Санкт-Петербурга изменяется слабо и незаметно. Потому, как основные территории, которые могут быть озеленены уже таковыми являются, либо естественным образом, то есть образовав заросли, либо посредством создания ландшафтных проектов. Однако большинство малых дворовых территорий, улиц, площадей, на которых могло быть сформировано качественное озеленение не сформировано, а также активно не используется подход «зеленых зданий» с озеленением фасадов и крыш, в местах, где это может быть сформировано.

«Зеленая архитектура» представляет собой подход, направленный на создание устойчивых, энергоэффективных зданий. В последнее время важнейшим аспектом этого направления является ландшафтный дизайн, который успешно интегрирует в городскую среду природные элементы. В сочетании с концепцией «зеленых» зданий, ландшафтный дизайн становится важным фактором в создании устойчивых, экологичных, комфортных пространств, а также является эстетическим элементом [7].

Важнейшими задачами ландшафтного дизайна в рамках «зеленой архитектуры» можно назвать:

- сохранение биоразнообразия в урбанизированной среде за счет создания садов, парков, вертикального озеленения, зеленых крыш;
- уменьшение «острова тепла» и создание комфортного микроклимата;
- поддержание экологической устойчивости зелеными зонами, которые помогают уменьшить загрязнение воздуха и контролировать эрозию почв.

В рамках «зеленой архитектуры» ландшафтный дизайн становится неотъемлемой частью проектирования здания. В «зеленые здания» могут быть интегрированы такие элементы как зеленые крыши

и террасы, вертикальные сады, размещенные на стенах зданий, проектирование озелененных дворов, прогулочных зон в общественных и частных территориях, системы для сбора дождевой воды, используемые для полива растений и других нужд.

«Зеленая архитектура» – это необходимость для создания устойчивых экологических и комфортных городов. Интеграция природы при проектировании зданий поможет улучшить экологическую ситуацию в урбанизированных территориях и создать гармоничное сосуществование человека и природы

### Литература

1. Распоряжение Правительства РФ «Об утверждении Стратегии пространственного развития Российской Федерации на период до 2025 года» от 13.02.2019 г. № 207-р [Электронный ресурс]. – URL: <http://government.ru/docs/all/120647/>

2. *Майснер Т. Н.* Урбанизация и экология городской среды: риски и перспективы устойчивого развития // Гуманитарий Юга России. – 2020. – № 3. – С. 190–201.

3. *Воронин А. А.* Вопросы экологии архитектуры многоэтажного жилища // Жилищное строительство. – 2005. – № 4. – С. 19–20.

4. *Родионовская И. С., Попов А. В.* Ландшафтная экологизация университетской среды // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: сб. трудов Междунард. научн. конф. (Москва, 19–21 октября 2011 г.) в 2 т. Т. 1. – М. : Московский гос. строит. ун-т., 2011. – С. 249–251.

5. *Попов А. В.* Архитектурная экологизация внешней среды крупных учебных заведений // Сборник докладов научно-технической конференции по итогам международных архитектуры Института строительства и архитектуры (апрель 2010 г.) – М. : Московский гос. строит. ун-т., 2010. – С. 116–122.

6. *Касимова А. Р.* Роль озеленения покрытий зданий в создании экоустойчивой среды обитания // Строительство – формирование среды жизнедеятельности [Электронный ресурс] : сборник материалов XIX Международной межвузовской научно- практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых [27–29 апреля 2016 г., Москва] / М-во образования и науки РФ, Нац. исследоват. Моск. гос. строит. ун-т. – Электрон. дан. и прогр. (46,6 Мб). – М.: НИУ МГСУ, 2016. – С. 100–103.

7. Экология крупного города (на примере Москвы). Учебное пособие / Под общей ред. д. б. н. А. А. Минина / – М. : ПАСЬВА, 2001. – 192 с.

## Секция «Геодезия, землеустройство и кадастры»

**УДК 332.6**

*Алина Евгеньевна Ныrkова,*  
студент

*Никита Викторович Волков,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*E-mail: nyrkowa.alina@yandex.ru,*  
*Volkov.nikita@yahoo.com*

*Alina Evgenievna Nyrkova,*  
student

*Nikita Viktorovich Volkov,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*E-mail: nyrkowa.alina@yandex.ru,*  
*Volkov.nikita@yahoo.com*

### **РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ КАДАСТРОВОЙ ОЦЕНКИ ЗЕМЕЛЬНЫХ УЧАСТКОВ**

#### **REGIONAL FEATURES OF CADASTRAL VALUATION OF LAND PLOTS**

В статье анализируются отличающиеся подходы к формированию оценочного зонирования при проведении государственной кадастровой оценки земельных участков в г. Санкт-Петербург и республике Дагестан. Рассмотрены «сеточный метод» и его усовершенствованная версия «сетка гексагонов», применяемые в Санкт-Петербурге и Казани, соответственно, для учета разности влияния какого-либо объекта, формирующего ценообразующее качество, на земельный участок. Авторами проведен анализ методов оценки, в частности ценового зонирования, земельных участков в г. Махачкала и территории республики Дагестан: описана процедура расчета значения ценообразующего фактора «рейтинг населенного пункта», применяемая для земельных участков, расположенных в удалении от центра г. Махачкала, сделан вывод о причинах применения различных подходов при проведении государственной кадастровой оценки земельных участков.

*Ключевые слова:* кадастровая оценка, ценообразующие факторы, региональные особенности, земельные участки, кадастровая стоимость.

The article analyzes different approaches to the formation of appraisal zoning during the state cadastral assessment of land plots in St. Petersburg and the Republic of Dagestan. The “grid method” and its improved version, the “hexagon grid”, are considered, which are used in St. Petersburg and Kazan, respectively, to take into account the difference in the influence of any object that forms the price-forming

quality on a land plot. The authors analyzed the methods of assessment, in particular price zoning, of land plots in the city of Makhachkala and the territory of the Republic of Dagestan: they described the procedure for calculating the value of the price-forming factor “settlement rating”, applied to land plots located far from the center of Makhachkala, and drew a conclusion about the reasons for using different approaches when conducting state cadastral assessment of land plots.

*Keywords:* cadastral valuation, price-forming factors, regional peculiarities, land plots, cadastral value.

В 2022 году проходил последний тур государственной кадастровой оценки земельных участков в 85 регионах Российской Федерации. Для анализа наличия значимых отличий в ценообразующих факторах и методах расчета кадастровой стоимости сравним два различных по своим характеристикам субъекта: город федерального назначения Санкт-Петербург и республику Дагестан.

Для более конкретного анализа разберем земельные участки, предназначенные для индивидуального жилищного строительства, садоводства и огородничества, поскольку это один из наиболее распространенных на рынке видов использования земельных участков. В Санкт-Петербурге данные объекты недвижимости составляют сегмент: «Садоводство, огородничество и индивидуальная жилая застройка», в Дагестане участки объединены в группу 13.1 «Садоводческое, огородническое и дачное использование, малоэтажная жилая застройка». Различия в сегментации обусловлено существующими особенностями рынка земельных участков.

В Санкт-Петербурге кадастровая стоимость таких участков определяется сравнительным методом, с помощью мультипликативной модели с девятью факторами: влияние локальных центров, социальная инфраструктура, близость к водным объектам, рекреационные зоны, коттеджные поселки, инженерная инфраструктура, оценочная зона, наличие обременений от инженерных коммуникаций и дополнительная скидка на площадь земельного участка. Для установления значений факторов анализируется семантическая информация, принадлежность объекта оценки определенному характеризующему территории слою, используются сведения, собранные бюджетным учреждением в базы данных, а также применяется «сеточный метод» расчета фактора [1].

«Сеточный метод» – метод, предложенный сотрудниками бюджетного учреждения для учета разности влияния какого-либо объекта, который формирует ценообразующее качество, на земельный участок большой площади. При значительной площади влияние объекта может изменяться в пределах участка. Суть метода в разбиении всей территории города на сетку квадратов со сторонами 20 метров и вычисление значения фактора для конкретной ячейки. В дальнейшем определяется средневзвешенное значение фактора для данного земельного участка.

Расчет расстояния описывается формулой из отчета об итогах проведения государственной кадастровой оценки на территории Санкт-Петербурга [1] представленной на рисунке 1. Рассчитывается кратчайшее расстояние по прямой в метрах ( $L$ ) от центра ячейки до центра города - осевой линии Невского проспекта от Адмиралтейского проспекта до площади Восстания. Также на основе рыночных данных строится радиус, при котором значение влияния фактора не равно нулю ( $\Delta R$ ) и радиус

$$f(L) = \exp \left[ - \left( \frac{L - R_0}{\Delta R} \right)^n \right]$$

Рис. 1. Формула для расчета фактора  
«Влияние общегородского центра»

обеспечивающий одинаковое значение от нуля до  $R_0$  метров, определяется показатель степени –  $n$ .

Похожая система расчета факторов используется в Республике Татарстан, в данном случае город разбивается на сетку гексагонов с длиной грани примерно 57,7 метров. В отчете об итогах Государственной кадастровой оценки Татарстана указаны преимущества использования сетки правильных шестиугольников [2]:

- Форма гексагонов позволяет уменьшить смещение выборки из-за краевых эффектов. Поскольку, такая форма позволяет приблизиться к максимально низкому соотношению периметра к площади, так как гексагон наиболее близкая к кругу фигура, которая может создать сетку;
- Представление кривых в распределении данных является более естественным.

Примерное изображение такой сетки приведено из отчета об итогах проведения государственной кадастровой оценки в Татарстане 2022 года [2] на рис. 2.

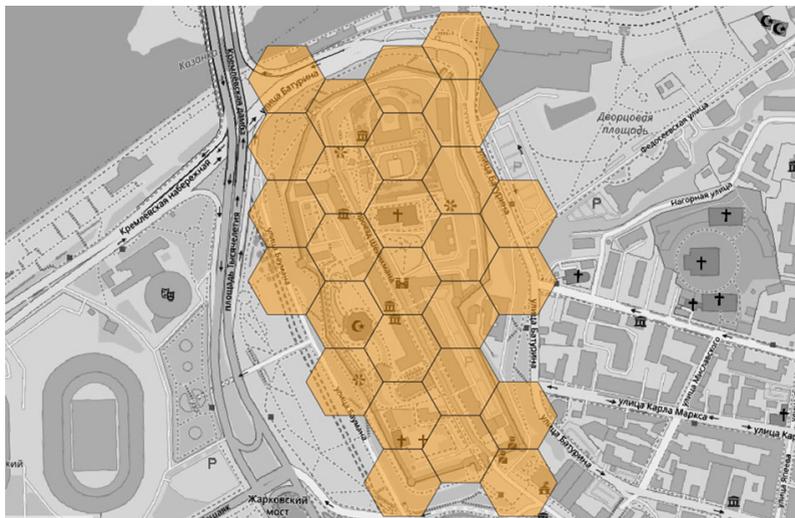


Рис. 2. Сетка гексагонов, необходимых для расчета ценообразующих факторов на территории Республики Татарстан

Был проведен анализ методов оценки земельных участков в Республике Дагестан. Ценообразующие факторы сегмента «13. Садоводство и огородничество, малоэтажная жилая застройка» в республике определены единым перечнем:

- расстояние до центра города по ГИС г. Махачкалы (до площади Ленина);
- расстояние до центра города по ГИС (центр городского населенного пункта);
- рейтинг населенного пункта.

Расстояние до центра города считается по местным геоинформационным системам «Муниципальная геоинформационная система г. Махачкалы», так как в отчете об итогах государственной кадастровой оценки Дагестана не указаны конкретные координаты центра

города, поэтому, при поиске информации в общедоступных ресурсах, было выявлено, что центр города – площадь Ленина. Аналогично определены центры городских населенных пунктов.

Статистические модели в сегменте «Садоводство и огородничество, малоэтажная застройка» различаются в зависимости от ценовой зоны. Ниже приведено оценочное зонирование на территории г. Махачкала и зоны сельских населенных пунктов на территории Дагестана в целом из отчета об итогах проведения государственной кадастровой оценки на территории республики [3] 2022 (рис. 3, 4).

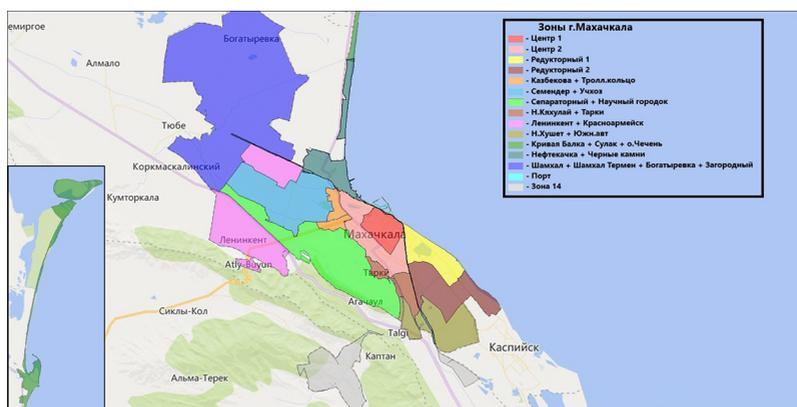


Рис. 3. Ценовое зонирование на территории г. Махачкала и территории республики

В оценочных зонах, расположенных в сильном отдалении от г. Махачкалы фактор расстояние до центра города не имеет сильного влияния на кадастровую стоимость участков из-за крайне низкой деловой активности в этих районах. Исходя из этого, в статистической модели для таких объектов используется фактор «рейтинг населенного пункта» (КЛАДР – Классификатор адресов Российской Федерации). Этот фактор показывает коэффициент экономического устаревания (учет уровня цен на недвижимость, численности населения, наличия социальной и инженерной инфраструктуры, расстояние до Федеральной автодороги и расстояние до центра районного/городского муниципального округа). Рассчитывается обобщенный

показатель всех вышеперечисленных числовых показателей, который определяется путем вычисления среднего геометрического значения факторов. Таким образом, экономическое устаревание равно  $((1 - \text{коэффициент интегрального показателя}) * 100 \%)$ .

Дагестан (городские населенные пункты)

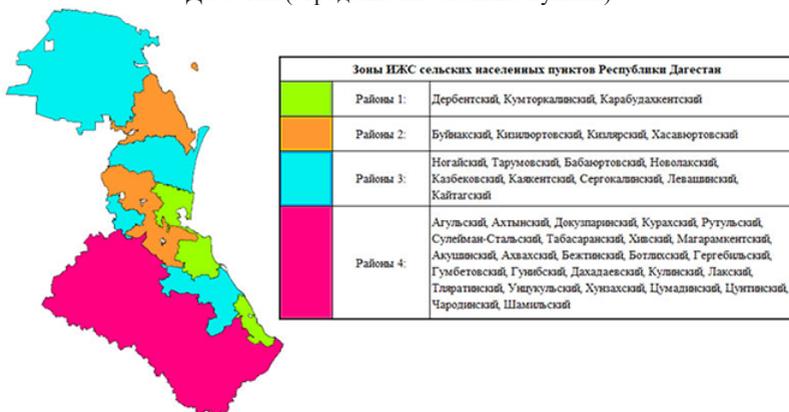


Рис. 4. Зонирование сельских населенных пунктов на территории Республики Дагестан

Таким образом можно сделать вывод, что кадастровая оценка в двух рассмотренных регионах значительно отличается. Субъекты с более развитыми рынком, программным обеспечением и налаженной системой межведомственного взаимодействия могут позволить добавить ценообразующие факторы, которые значительно улучшают модель и позволяют намного точнее описать кадастровую стоимость. Для возможности усиления статистических моделей большим количеством факторов необходимо четко определить межведомственные взаимодействия бюджетного учреждения и других государственных структур на территории данного субъекта.

### Литература

1. Отчет об итогах государственной кадастровой оценки земельных участков, расположенных на территории Санкт-Петербурга по состоянию на 01.01.2022 г. от 12.09.2022 № 5/2022.

2. Отчет об итогах государственной кадастровой оценки земельных участков, расположенных на территории республики Татарстан по состоянию на 01.01.2022 г. от 17.10.2022 № 1-2022-ЗЕМ.

3. Отчет об итогах государственной кадастровой оценки земельных участков, расположенных на территории республики Дагестан по состоянию на 01.01.2022 г. от 18.10.2022 № 004/2022.

УДК 339.54.012

*Анна Павловна Романова,*

магистрант

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

*E-mail: KraLaw@yandex.ru*

*Anna Pavlovna Romanova,*

Master's degree student

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

*E-mail: KraLaw@yandex.ru*

## **РАЗНОСТЬ ТРАКТОВАНИЯ В НОРМАТИВНО- ПРАВОВЫХ АКТАХ КАК ПРЕПЯТСТВИЕ В СОГЛАСОВАНИИ И УТВЕРЖДЕНИИ ДОКУМЕНТАЦИИ ПО ПЛАНИРОВКЕ ТЕРРИТОРИИ**

### **THE DIFFERENCE OF INTERPRETATION IN REGULATORY LEGAL ACTS AS AN OBSTACLE IN THE COORDINATION AND APPROVAL OF DOCUMENTATION ON THE PLANNING OF THE TERRITORY**

Данная статья является продолжением темы публикации журнала РИНЦ № 12 2024 в части рассмотрения вопросов, возникающих при разработке документации по планировке территории для размещения линейных объектов, с которыми проектировщики сталкиваются на этапе получения согласований и утверждения ДПТ. Одной из причин получения отрицательного результата связана с имеющимися в настоящее время противоречиями в подходах согласования между государственными ведомствами, участвующими в согласовании и утверждении ДПТ. В данной статье рассмотрены проблемные случаи, выявленные на практике в процессе разработки и согласования ДПТ, возникающие в следствии различной трактовки градостроительного законодательства, и возможные пути решения возникшего вопроса.

*Ключевые слова:* согласование и утверждение ДПТ, Градостроительный кодекс, линейный объект.

This article is a continuation of the topic of the publication of the RSCI journal No. 12 2024 regarding the consideration of issues arising during the development of documentation on the layout of the territory for the placement of linear objects, which designers face at the stage of obtaining approvals and approving the DPT. One of the reasons for the negative result is related to the current contradictions in the approaches of coordination between government agencies involved in the coordination and approval of the DPT. This article examines the problematic cases identified

in practice during the development and approval of the DPT, arising from different interpretations of urban planning legislation, and possible solutions to the issue.

*Keywords:* coordination and approval of the DPT, Urban planning code, linear object.

Программа газификации регионов – масштабная работа, проводимая в настоящее время в нашей стране [1]. Она является насущной темой для многих участников данного процесса, поскольку прежде, чем газ поступит потребителю и произойдет улучшение качества жизни, предшествует трудоемкий процесс работы инженеров-проектировщиков и далее строителей.

В данной статье мы остановимся на трудностях, с которыми сталкиваются инженеры-проектировщики на этапе подготовки документов и материалов для установления и осуществления публичных сервитутов для размещения объекта в границах строительства, а более конкретно – на этапе согласований землеотводной документации при размещении линейного объекта в границах особо охраняемых территорий (далее по тексту ООПТ), а также в границах двух муниципальных образований.

### **Случай 1**

Любое проектирование начинается с выбора трассы прохождения линейного объекта (далее по тексту ЛО) и подготовке землеотводных документов [2].

Итак, имеется задача на территории области «В» построить распределительный газопровод с проектным рабочим давлением не более 1,2 мегапаскаля для газификации населенного пункта «А», расположенного в границах ООПТ федерального значения, на территории муниципального района «N» (рис. 1).

Границы ООПТ определены соответствующим Положением, утвержденным приказом Минприроды РФ (далее по тексту Положение). Сведения о границах ООПТ отражены в ЕГРН. При этом, земельные участки в границах ООПТ отнесены к землям лесного фонда.

Также Положением об ООПТ определена возможность строительства газопровода с целью обеспечения функционирования нужд населенных пунктов, расположенных в границах ООПТ. Таким об-

разом, размещение ЛО возможно в границах ООПТ, т. к. он является объектом, обеспечивающим газом потребителей населенного пункта «А» [3].

Проектировщиками для однозначного толкования требований Положения в части размещения ЛО в границах ООПТ получено письмо Минприроды РФ, подтверждающее возможность размещения объекта в границах ООПТ с учетом соблюдения режимов охраны на территории ООПТ, установления публичного сервитута и получения разрешения на строительство.

Согласно техническим условиям на подключение к действующей газотранспортной системе (далее по тексту ГТС) области начальная точка проектирования нового газопровода определена в границах городского округа «D» (далее по тексту ГО). А далее проектируемая трасса газопровода пересекает административную границу между двумя муниципальными образованиями и проходит по территории МР «N» до своей конечной точки – населенный пункт «А».

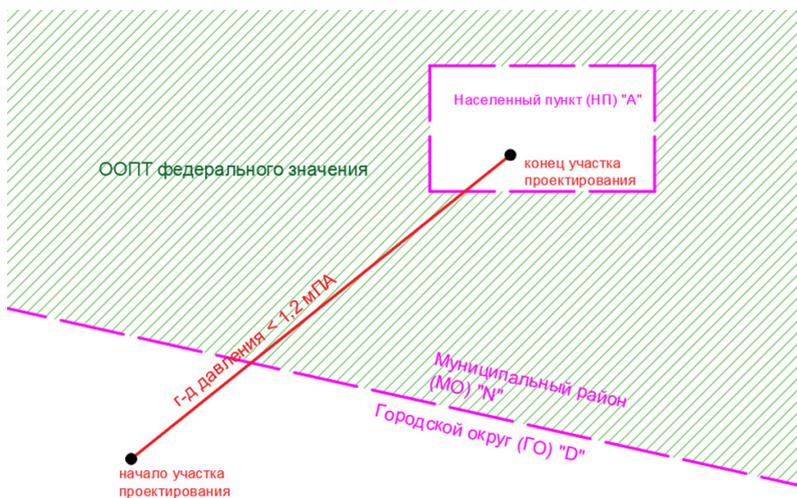


Рис. 1. Схема расположения газопровода (иллюстрация к 1-му случаю)

Таким образом, трасса проектируемого ЛО проходит по территории двух административных образований – МР и ГО. В соответствии

с пунктом 4 ч. 3 ст. 41 ГрК РФ возникает необходимость подготовки ДПТ, ее согласование с уполномоченными органами и утверждение Департаментом Архитектуры и градостроительства области «В», и далее установление публичного сервитута [4].

Действуя согласно градостроительным нормам, проектировщик разрабатывает ДПТ, состав и содержание которой соответствует требованиям постановления Правительства РФ от 12.05.2017 № 564 «Об утверждении Положения о составе и содержании документации по планировке территории, предусматривающей размещение одного или нескольких линейных объектов», и в соответствии с требованиями ч. 12.3, 12.7 ст. 45 ГрК РФ направляет ее на согласование в следующие органы власти: главой ГО, управлением лесных отношений области, а также Минприроды РФ [2, 4].

И если региональные органы власти приходят к выводу, что ДПТ соответствует нормам действующего законодательства и выдают свое согласование, то Минприроды РФ выдает ответ с формулировкой «Об отсутствии оснований для рассмотрения вопроса о согласовании испрашиваемой документации» со ссылкой на постановление Правительства РФ от 12.11.2020 № 1816 «При строительстве/реконструкции газопроводов с проектным рабочим давлением не более 1,2 Мпа не требуется подготовка ДПТ» [5].

Для уточнения позиции касательно необходимости подготовки ДПТ получены разъяснения от Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, согласно которым подготовка ДПТ является обязательной в случае, если размещение объекта капитального строительства планируется на территориях двух и более муниципальных образований, имеющих общую границу, в том числе в случае, если линейный объект в целях строительства, реконструкции которого подготовлена ДПТ, по своим характеристикам соответствует постановлению Правительства Российской Федерации от 12 ноября 2020 г. № 1816 [5].

Проектировщик, вооружившись ответом Минстроя РФ, повторно направляет на согласование ДПТ в Минприроды РФ.

Ответ Минприроды РФ остается неизменным. На основании постановления Правительства Российской Федерации от 12 ноября 2020 г. № 1816 при строительстве или реконструкции газопроводов

с проектным рабочим давлением не более 1,2 мегапаскаля не требуется подготовка документации по планировке территории. Учитывая изложенное, Минприроды России не находит оснований для рассмотрения вопроса о согласовании испрашиваемой документации по планировке территории» [5].

Соответственно, Департамент Архитектуры и градостроительства области «В» отказал в утверждении ДПТ, сославшись на письмо – разъяснение от Минстроя РФ и необходимость согласования ДПТ с Минприродой РФ согласно ч. 12.3 ст. 45 ГрК РФ [4].

Таким образом, со стороны проектировщика были предприняты все возможные меры по решению проблемы. Учитывая сроки рассмотрения обращений нашей исполнительной властью весь процесс официальной переписки занял почти 1,5 года. Однако вопрос не решен и по настоящий момент, что ставит по вопрос реализацию проекта, входящего в состав федеральной программы газификации регионов.

Решение данной проблемы видится внесением изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 12 ноября 2020 г. № 1816, где будет четко указано в каком случае есть исключения для перечисленных в нем объектов и требуется разработка ДПТ.

## **Случай 2**

Рассмотрим еще один пример разного понимания одной и той же нормативной нормы. А именно, ч. 2 ст. 45 ГрК РФ, которая гласит, что федеральные исполнительные органы власти утверждают ДПТ для линейных объектов, расположенных на территории двух и более регионов РФ [4]. Казалось бы, как можно по-разному трактовать данную норму – один регион значит утверждаем ДПТ в регионе, два и более регионов, утверждаем на федеральном уровне, проще не бывает.

Как выясняется, проблема может возникнуть в установлении факта нахождения в двух и более субъектах РФ, а теперь подробнее.

Заданием на проектирование предусматривается реконструкция систем технологической связи вдоль коридора магистральных газопроводов, для повышения эффективности управления технологическими процессами транспорта газа. Реконструкция подразумевает строительство пяти мачт радиорелейной связи, 4 из которых находятся на территории одного субъекта РФ, а одна на территории другого

субъекта РФ, имеющих общую границу. При этом, мачты связи, механически между собой не связаны (между ними не проходят кабели связи, электрики или другие ЛО), т. е. каждую мачту можно рассматривать как отдельный объект, но при этом, радиорелейная связь не будет функционировать, если не будет работать хотя бы одна из пяти мачт (рис. 2).

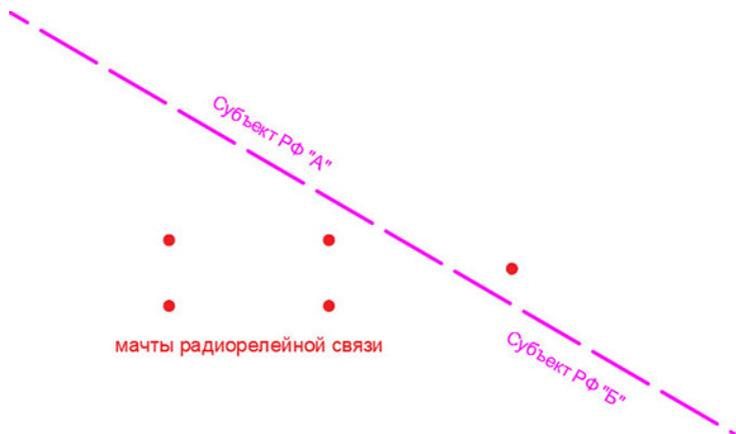


Рис. 2. Иллюстрация ко 2-му случаю

Принимая во внимание задание на проектирование и задание на подготовку ДПТ, в которых в графе «местоположение объекта» указано два субъекта РФ, руководствуясь ч. 2 ст. 45 ГрК РФ, проектировщик после получения согласований в установленном порядке, направляет разработанную ДПТ на утверждение в федеральный орган исполнительной власти (далее – ФО) [4]. По итогам рассмотрения ДПТ, ФО отказывает в ее утверждении по следующему основанию: невозможно установить признаки отнесения объекта к объектам федерального значения в связи с тем, что объект представляет собой хаотично расположенные мачты связи, которые не пересекают границы субъектов РФ.

То есть, по мнению ФО, объект находится в двух регионах, если он физически (т. е. в грунте или наземно-, надземно-) пересекает их границу. Но в ч. 2 ст. 45 ГрК РФ такой нюанс не указан [4].

Проектировщик, принимая во внимание позицию ФО, направляет ДПТ на утверждение в оба субъекта РФ и получает следующий ответ: проектируемый объект находится на территории двух субъектов РФ, в связи с чем, согласно ст. 45 ГрК РФ, разработанная ДПТ подлежит утверждению в ФО исполнительной власти [4].

Проектировщик направляет повторный запрос в ФО, ссылаясь на полученные отказы от субъектов РФ. Итогом рассмотрения обращения является письмо ФО следующего содержания: позиция ФО по данному вопросу остается неизменной.

Возникает вопрос: что же является критерием определения положения объекта в двух регионах - физическое пересечение границы данных регионов или функциональная зависимость подобъектов (входящих в один объект) друг от друга и расположенных в разных регионах РФ? Вопрос остается открытым.

По мнению автора, размещение объекта подтверждается утвержденным в установленном порядке заданием на проектирование объекта, как юридически значимого документа (ч. 11 ст. 48 ГрК РФ) [4]. А физическое пересечение границы субъекта – это всего лишь метод (инструменты) функционирования и строительства объекта.

Для исключения возникновения подобных случаев в будущем, предлагается дополнить ч. 2 ст. 45 ГрК РФ фразой: «...двух и более субъектов Российской Федерации (вне зависимости от условий пересечения объектом границ между данными субъектами)...» [4].

P.S. после года переписки с ФО и региональными органами, удалось утвердить ДПТ в каждом регионе РФ, но опять же это было индивидуальное решение вопроса для конкретного объекта.

Не смотря на «урегулированность» процедуры утверждения ДПТ, существует ряд проблем, возникающих при реализации данного процесса на практике, где проектировщик становится заложником ситуации и не может выполнить поставленные задачи. Что в свою очередь влияет на возможность реализации инвестиционных проектов, направленных на развитие экономики регионов, а также на улучшение качества жизни населения.

В данном случае только единообразный подход к трактованию согласующими органами власти законодательных и нормативных документов, а также оперативное решение вопросов между участниками

процесса согласования ДПТ позволит обеспечить прозрачный, единообразный и понятный подход к согласованию и утверждению ДПТ и, как следствие, последующей реализации строительства линейных объектов, являющихся важным фактором обеспечения комфортных условий проживания населения на территории нашей страны.

### **Литература**

1. О порядке разработки и реализации межрегиональных и региональных программ газификации жилищно-коммунального хозяйства, промышленных и иных организаций: постановление Правительства РФ от 10 сентября 2016 г. № 903 [ред. от 28.11.2023] // Собрание законодательства РФ. – 2016. – № 38. – Ст. 5582.

2. Об утверждении Положения о составе и содержании документации по планировке территории, предусматривающей размещение одного или нескольких линейных объектов: постановление Правительства РФ от 12 мая 2017 г. № 564 [ред. от 28.11.2023] // Собрание законодательства РФ. – 2017. – № 21. – Ст. 3013.

3. Об особо охраняемых природных территориях: федеральный закон от 14 марта 1995 г. № 33-ФЗ [ред. от 02.08.2019] // Собрание законодательства РФ. – 1995. – № 12. – Ст. 1024.

4. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ [ред. от 04.11.2023] // Собрание законодательства РФ. – 2005. – № 1 (часть I). – Ст. 16.

5. Об утверждении перечня случаев, при которых для строительства, реконструкции линейного объекта не требуется подготовка документации по планировке территории, перечня случаев, при которых для строительства, реконструкции объекта капитального строительства не требуется получение разрешения на строительство, перечня случаев, при которых для создания горных выработок в ходе ведения горных работ не требуется получение разрешения на строительство, внесении изменений в перечень видов объектов, размещение которых может осуществляться на землях или земельных участках, находящихся в государственной или муниципальной собственности: постановление Правительства РФ от 12 ноября 2020 г. № 1816 [ред. от 28.11.2023] // Собрание законодательства РФ. – 2020. – № 47 (часть I). – Ст. 7374.

**УДК 528.9:39**

*Мила Дома Юлиеми де ла Каридад,*  
магистрант  
(Санкт-Петербургский государственный  
университет),  
(Институт геологии и палеонтологии  
Геологической службы  
Республики Кубы)

*Инесса Евгеньевна Сидорина,*  
канд. геогр. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный  
университет)

*E-mail: st116052@student.spbu.ru,*  
*yuliemi@igp.minem.cu,*  
*i.sidorina@spbu.ru*

*Mila Doma Yuliemi de la Caridad,*  
Master's degree student  
(Saint Petersburg State  
University),  
(Institute of Geology and Paleontology  
of the Geological Survey  
of the Republic of Cuba)  
*Inessa Evgenievna Sidorina,*  
PhD in Sci. Geogr., Associate Professor  
(Saint Petersburg State  
University)

*E-mail: st116052@student.spbu.ru,*  
*yuliemi@igp.minem.cu,*  
*i.sidorina@spbu.ru*

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ  
ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ  
ПЕРЕПИСИ НАСЕЛЕНИЯ 2010 ГОДА**

**GEOINFORMATION MAPPING  
OF THE LENINGRAD REGION BASED ON THE DATA  
OF THE 2010 POPULATION CENSUS**

Геоинформационное картографирование – инструмент для анализа демографии и земельных ресурсов. Исследование Ленинградской области на основе переписи 2010 года выявило структуру расселения, плотность населения и изменения землепользования. ГИС обработали данные для визуализации динамики населения, разграничения городских и сельских районов, миграции и роста городов. Карты полезны для территориального планирования, развития и инфраструктуры. Геоинформатика обеспечивает визуальное представление для разработки политики на основе данных. Интеграция переписи с картографией важна для решения проблем роста городов, распределения ресурсов и устойчивого развития.

*Ключевые слова:* геоинформационное картографирование, ГИС, перепись населения 2010 года, Ленинградская область, пространственный анализ, плотность населения.

Geoinformation mapping is a tool for analysing demography and land resources. A study of the Leningrad region based on the 2010 census revealed settlement patterns, population density and land use changes. GIS processed the data to visualise

population dynamics, urban-rural delineation, migration and urban growth. Maps are useful for spatial planning, development and infrastructure. Geoinformatics provides visualisation for data-driven policy making. Integrating census with cartography is important for addressing urban growth, resource allocation and sustainable development.

*Keywords:* geoinformatics mapping, GIS, population census 2010, Leningrad Region, spatial analysis, population density.

## **Введение**

Геоинформационное картографирование зарекомендовало себя как важнейший инструмент территориального анализа, позволяющий интегрировать и визуализировать большие объемы пространственных данных. В контексте Ленинградской области сочетание передовых методов картографирования с результатами переписи населения 2010 года позволяет получить подробное представление о демографическом распределении, динамике урбанизации и изменениях в землепользовании.

Данное исследование направлено на пространственное представление информации переписи с помощью географических информационных систем (ГИС), что облегчает анализ структуры населения, его плотности и ключевых социально-экономических факторов. Геоинформационное картографирование не только обеспечивает интуитивно понятную визуальную основу для интерпретации данных, но и позволяет моделировать и прогнозировать, что способствует пространственному планированию, устойчивому развитию и разработке эффективной государственной политики.

Благодаря сбору, обработке и картографическому представлению данных переписи населения, данная работа дает обновленную картину региона, позволяя выявить такие тенденции, как рост городских территорий, внутренняя миграция и изменения в демографической структуре. Также будут изучены последствия этих выводов для инфраструктуры, предоставления услуг и управления природными ресурсами.

Геоинформационное картографирование, объединяющее технологии и данные переписи населения, становится мощным инструментом для принятия решений на основе фактических данных. В данном исследовании мы стремимся не только задокументировать текущее

состояние населения Ленинградской области, но и заложить основу для будущих исследований, которые будут способствовать сбалансированному и устойчивому развитию территорий.

### **Описание материалов и методов анализа**

Источники данных:

- Данные переписи населения: Основным источником информации о плотности и этническом составе населения, скорее всего, являются официальные данные переписи населения Российской Федерации. Эти данные содержат подробную информацию о распределении населения и демографических характеристиках.

- Геопространственные данные: Геопространственные данные были бы использованы для определения административных границ Ленинградской области и ее подразделений. Эти данные позволяют создать базовую карту, на которую накладывается информация о плотности населения.

Обработка данных:

- Анализ плотности населения: Плотность населения рассчитывается путем деления числа жителей каждого административного района на его площадь. Результаты классифицируются по диапазонам, указанным в легенде (менее 5 и более 35 жителей/км<sup>2</sup>).

- Анализ этнического состава: данные переписи населения о распределении этнических групп будут обработаны для определения доли каждой группы в общей численности населения региона. Эти данные будут представлены на горизонтальной гистограмме.

- ГИС (географические информационные системы): для создания карты плотности населения будет использовано программное обеспечение ГИС. Это программное обеспечение позволяет визуализировать и анализировать геопространственные данные.

Создание диаграммы:

- Карта плотности населения: будет создана хороплетная карта, на которой цветами обозначены различные диапазоны плотности населения.

- Легенда: добавляются четкие и лаконичные легенды, объясняющие значение цветов на карте и столбиков на графике.

## Обсуждение результатов

Анализ Ленинградской области показывает сложное распределение населения, характеризующееся заметными колебаниями плотности и отличительной демографической структурой. Карта плотности населения показывает значительную концентрацию жителей на отдельных территориях с плотностью более 35 человек на квадратный километр, что свидетельствует о наличии городских центров или районов с высокой экономической активностью (рис. 1). Напротив, на значительных участках территории плотность населения составляет менее 5 человек на квадратный километр, что свидетельствует о рассеянии населения в сельских или менее развитых районах.

Анализ таблицы показывает половозрастной состав населения, насчитывающего 1716,9 тысяч человек, что свидетельствует о дисбалансе, когда доля мужчин (918,9 тысяч) выше, чем женщин (798 тысяч). Возрастная структура показывает относительно молодое население: 220,1 тысячи детей и подростков (0–14 лет), из которых 112,6 тысячи женщин и 107,5 тысячи мужчин, что свидетельствует о значительной представленности этой группы.

Кроме того, имеется значительное количество людей продуктивного возраста (15–59 лет), причем 786,7 тысячи человек относятся к возрастной группе 15–29 лет, а 364 тысячи – к группе 30–44 лет. При рассмотрении гендерного распределения по возрастным группам выявляются интересные закономерности. В старших возрастных группах (45–74 года) наблюдается более высокая доля мужчин, что может свидетельствовать о различиях в продолжительности жизни между полами. В частности, в возрастной группе 45–59 лет насчитывается 227,5 тысячи мужчин против 186,2 тысячи женщин, а в возрастной группе 60–74 года – 150,8 тысячи мужчин против 89,8 тысячи женщин. Эта тенденция также сохраняется в возрастной группе 75+, где 79 тысяч мужчин против 25,7 тысячи женщин.

Эти данные свидетельствуют о том, что, несмотря на относительно молодую структуру населения и значительную численность рабочей силы, в старших возрастных группах также существуют различия в распределении по полу. Как показано в таблице.

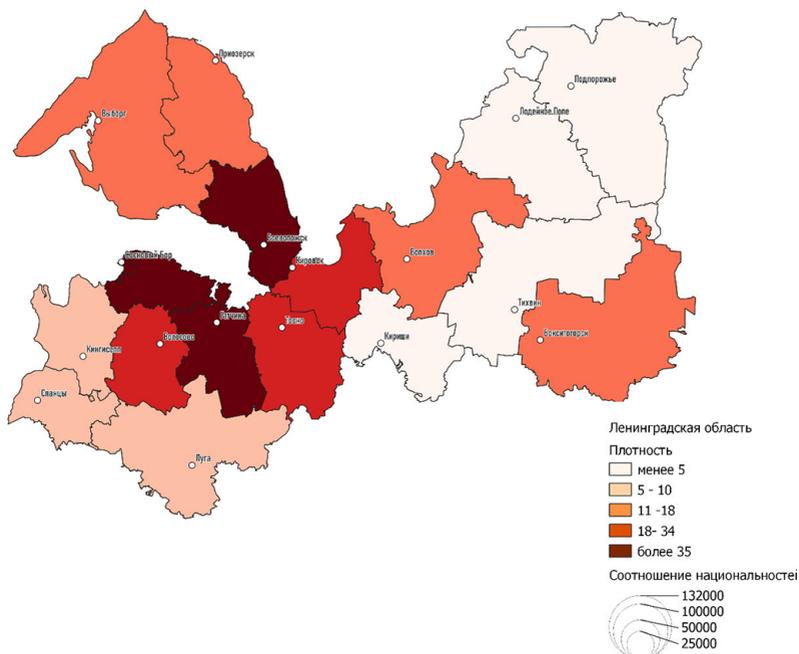


Рис. 1. Карта плотности населения Ленинградской области

**Состав населения по гендерному и возрастному признаку, тыс. чел.**

Всего включая в возрасте, лет:	Все население	Женщины	Мужчины
		1716,9	798
0 – 14	220,1	112,6	107,5
15 – 29	373,5	199,6	173,9
30 – 44	364	183,9	180,1
45 – 59	413,7	186,2	227,5
60 – 74	240,6	89,8	150,8
75 и более	104,7	25,7	79

## **Заключение**

Анализ Ленинградской области показывает сложную и многогранную демографическую картину. Распределение населения, характеризующееся заметными диспропорциями в плотности, отражает концентрацию жителей в городских центрах и районах с интенсивной экономической деятельностью, в отличие от рассеяния в сельской местности. Такое неравномерное распределение ставит вопрос о движущих силах внутренней миграции и регионального развития.

Возрастная и гендерная структура населения демонстрирует особую демографическую динамику. Преобладание мужчин, особенно в старших возрастных группах, указывает на возможные различия в продолжительности жизни между полами, и этот аспект заслуживает дальнейшего изучения. Наличие относительно молодого населения, а также значительной рабочей силы создает как возможности, так и проблемы для экономического и социального развития региона.

Этническое разнообразие, хотя и не получило подробного количественного описания в данном исследовании, усложняет демографическую картину. Взаимодействие между различными этническими группами и их влияние на социальную и культурную динамику региона – это области, которые требуют дальнейшего изучения.

В совокупности эти выводы подчеркивают необходимость государственной политики, направленной на устранение диспропорций в распределении населения, содействие справедливому региональному развитию и социальной интеграции и сплоченности различных демографических групп. В будущих исследованиях следует продолжить анализ факторов, определяющих демографическую динамику региона, включая социально-экономические, исторические и культурные аспекты, чтобы лучше понять всю сложность демографической реальности Ленинграда.

## **Литература**

1. *Алаев Э. Б.* Социально-экономическая география: Понятийно-терминологический словарь. М. : Мысль, 1983, 350 с.
2. *Анохин А. А.* География населения с основами демографии. Учебное пособие. М. : Издательство СПбГУ, 2015, 308 с.
3. *Бажукова Н. В., Балина Т. А., Чекменева Л. Ю.* Картографирование демографических процессов: традиции и современность // Вестник Геодезия и картография, 2020. № 11. С. 9–19.

4. Берлянт А. М. Геоинформационное картографирование. М. : МГУ, 1997, 64 с.
5. Берлянт А. М. Картография: Учебник для вузов. М. : Аспект Пресс, 2002, 336 с.
6. Берлянт А. М. Теория геоизображения. М. : ГЕОС, 2006, 262 с.
7. Бешенцев А. Н., Гармаев Е. Ж., Потаев В. С. Геоинформационный мониторинг территориальных социальноэкономических систем // Вестник Бурятского Государственного Университета. Экономика и менеджмент, 2019. № 3. С. 3–9.
8. Каргашин П. Е. Основы цифровой картографии: учебное пособие для бакалавров. М. : Издательско-торговая корпорация «Дашков и К», 2019, 106 с.
9. Косов П. И. Основы демографии. Учебное пособие. М. : ИНФРА-М, 2018, 288 с.
10. Лайкин В. И., Уноров, Г. А. Геоинформатика: учебное пособие. Комсомольск-наАмуре: Изд-во АмГПГУ, 2010, 162 с.
11. Nieves J. J., Bondarenko M., Kerr D., Ves N., Yetman G., Sinha P., Clarke D. J., Sorichetta A., Stevens F. R., Gaughan A. E., & Tatem A. J. (2021). Measuring the contribution of built-settlement data to global population mapping. *Social Sciences & Humanities Open*, 3(1), 100102. <https://doi.org/10.1016/J.SSAHO.2020.100102/>
12. Shang S., Du S., Du S. & Zhu S. (2021). Estimating building-scale population using multi-source spatial data. *Cities*, 111, 103002. <https://doi.org/10.1016/J.CITIES.2020.103002/>
13. Ural S., Hussain E., & Shan J. (2011). Building population mapping with aerial imagery and GIS data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 13(6), 841–852. <https://doi.org/10.1016/J.JAG.2011.06.004/>
14. Weber E. M., Seaman V. Y., Stewart R. N., Bird T. J., Tatem, A. J., McKee J. J., Bhaduri B. L., Moehl J. J., & Reith A. E. (2018). Census-independent population mapping in northern Nigeria. *Remote Sensing of Environment*, 204, 786–798. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2017.09.024/>

УДК 332.622

*Вероника Евгеньевна Рыбальченко,*  
студент

*Ксения Ивановна Ключенко,*  
преподаватель

(Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт

им. А. К. Кортунова – филиал

Донского государственного

аграрного университета)

*E-mail: ksen.mayer2017@yandex.ru,*

*rybalehenko.veronika@yandex.ru*

*Veronika Evgenievna Rybaltsenko,*  
student

*Kseniya Ivanovna Klyuchenko,*  
lecturer

(Novocherkassk Engineering  
and Melioration Institute

named after A. K. Kortunov –

branch of the Donskoy

State Agrarian University)

*E-mail: ksen.mayer2017@yandex.ru,*

*rybalehenko.veronika@yandex.ru*

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОЦЕНКИ РЫНОЧНОЙ СТОИМОСТИ НЕДВИЖИМОСТИ НА 2025 ГОД

### THE THEORETICAL BASIS FOR ESTIMATING THE MARKET VALUE OF REAL ESTATE IN 2025

В данной статье представляется теоретическая основа и методологический подход для оценки рыночной стоимости актива к 2025 году. Исследование охватывает текущие тенденции в экономике, законодательстве и рыночных механизмах, которые влияют на формирование стоимости недвижимости.

*Ключевые слова:* оценка, рыночная стоимость, недвижимость, показатели, тенденции.

This article presents a theoretical framework and a methodological approach for estimating the market value of an asset by 2025. The study covers current trends in economics, legislation, and market mechanisms that influence the formation of real estate values.

*Keywords:* valuation, market value, real estate, indicators, trends.

Оценка рыночной стоимости недвижимости представляет собой одну из ключевых задач в сфере экономики и управления, поскольку она напрямую влияет на принятие решений как частными лицами, так и организациями. В условиях динамично меняющегося рынка, особенно в свете глобальных экономических изменений, политиче-

ских факторов и социальных тенденций, актуальность данной темы становится особенно заметной.

Одной из ключевых задач данной работы является исследование методов оценки рыночной стоимости недвижимости. В рамках этого раздела будут рассмотрены как традиционные, так и современные подходы, включая сравнительный, затратный и доходный методы. Каждый из этих методов имеет свои особенности и применяется в зависимости от конкретных условий и целей оценки.

Также будет уделено внимание факторам, влияющим на формирование рыночной стоимости, таким как экономические условия, государственное регулирование, местоположение и состояние объектов недвижимости [1].

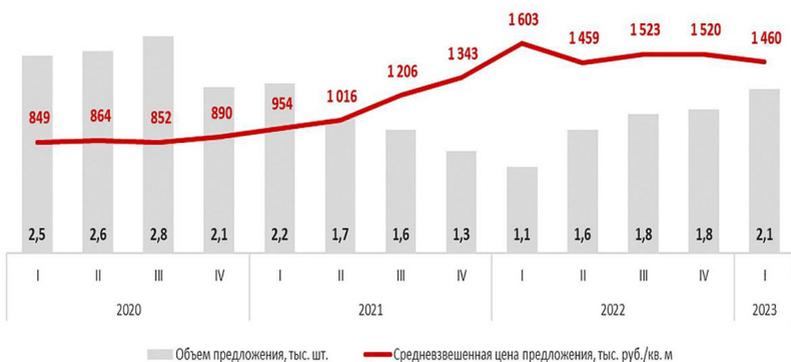


Рис. 1. Графики, иллюстрирующие динамику цен и объемов на рынке недвижимости

На рынке недвижимости в России 2024 года ожидается серьезная адаптация под влиянием экономических и социальных факторов, формирующих текущую динамику цен и спроса. Изменения в государственной ипотечной политике, снижение покупательской способности населения и изменяющиеся рыночные условия могут значительно затян timer процесс сделок по купле-продаже недвижимости.

Одним из ключевых факторов, который повлияет на активность на рынке, станут ипотечные ставки. Ожидается, что они останутся на высоком уровне, а первоначальный взнос, необходимый для получения

ипотечного кредита, возрастет до 30 % от стоимости недвижимости. Это может привести к тому, что спрос на жилье снизится от 20 % до 25 % в 2024 году, что существенно отразится на объемах сделок.

Несмотря на общее снижение спроса, прогнозы по ценам на жилье являются многообразными. В то время как на вторичном рынке ожидается падение цен на 10–20 %, первичный рынок может сохранить свои позиции благодаря государственным субсидиям и поддержке со стороны застройщиков. Аналитики также предполагают, что цены на ликвидную вторичную недвижимость могут снизиться на 5 %, в то время как старые здания могут подешеветь до 20 % [2]. Неравномерное развитие двух сегментов рынка показывает, как различные аспекты государственной политики могут сказываться на формировании цен.

Если говорить о текущих механизмах, поддерживающих рынок, то стоит отметить, что продолжающаяся наполняемость новых объектов позволила обрести некоторую стабильность в первичной недвижимости. Застройщики все еще охотно предлагают различные схемы привлечения клиентов и осуществления сделок, что также позволяет смягчить негативные последствия от повышения ставок [2]. Однако без государственных программ поддержки такие тенденции могут быстро утратиться.

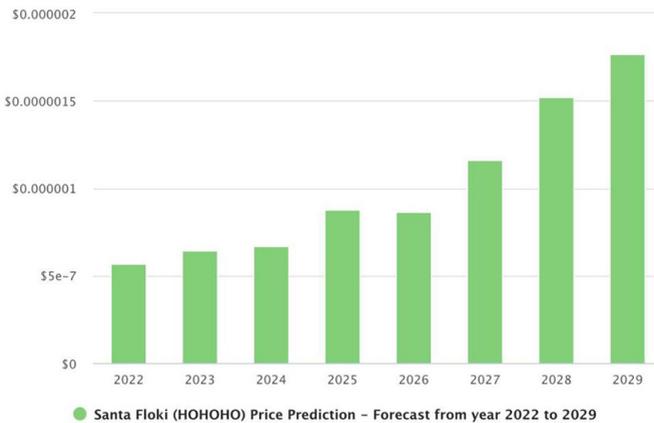


Рис. 2. Графики прогнозов изменения цен на недвижимость на 2025 год

Одним из основных факторов, оказывающих влияние на изменение цен, является экономическая ситуация в стране. Рост инфляции и нестабильность курса рубля могут привести к удорожанию строительных материалов и, как следствие, к увеличению цен на новые объекты недвижимости. В текущих реалиях рынок жилья ожидает серьезные изменения, и эксперты прогнозируют неминуемое снижение цен на вторичное жилье в 2025 году на уровне 20 % [3].

Внимание заслуживает также демографическая ситуация – по прогнозам, к 2025 году в России ожидается уменьшение численности населения, что в свою очередь негативно отразится на спросе на жилье [4]. С учетом этих изменений, многие потенциальные покупатели могут отложить сделки, надеясь на более выгодные условия в будущем.

Интересный аспект, который также стоит отметить, это влияние государственных программ на рынок недвижимости. В последние годы наблюдаются попытки государства стимулировать спрос через субсидирование ипотечных кредитов. Однако нововведения должны быть тщательными и сбалансированными, чтобы не допустить резкого увеличения цен, которое может произойти в краткосрочной перспективе.

Эксперты также выделяют проблемы, связанные с качеством жилья. На рынке наблюдается избыточное предложение низкокачественного жилья, что может отвлечь потенциальных покупателей от менее выгодных предложений. В этом контексте важно обратить внимание на качество объектов, поскольку потребители все чаще ищут долгосрочные инвестиции, а не краткосрочные желания по покупке [2].

Таким образом, прогнозы на 2024–2025 годы свидетельствуют о значительных изменениях на рынке недвижимости. Участники рынка должны быть готовы к неопределенности и адаптироваться к новым реалиям. Важно учитывать экономические, демографические и социальные факторы, которые формируют динамику цен и спроса.

Формирование рыночной стоимости недвижимости – это сложный процесс, зависящий от множества факторов. Одним из основополагающих является локация. Место, где расположены объекты, непосредственно влияет на их стоимость. Например, в городах центральные районы, как правило, характеризуются высокими ценами

из-за развитой инфраструктуры и удобного доступа к удобствам и услугам [4]. В этом контексте ценность недвижимости в благоприятных условиях значительно возрастает.

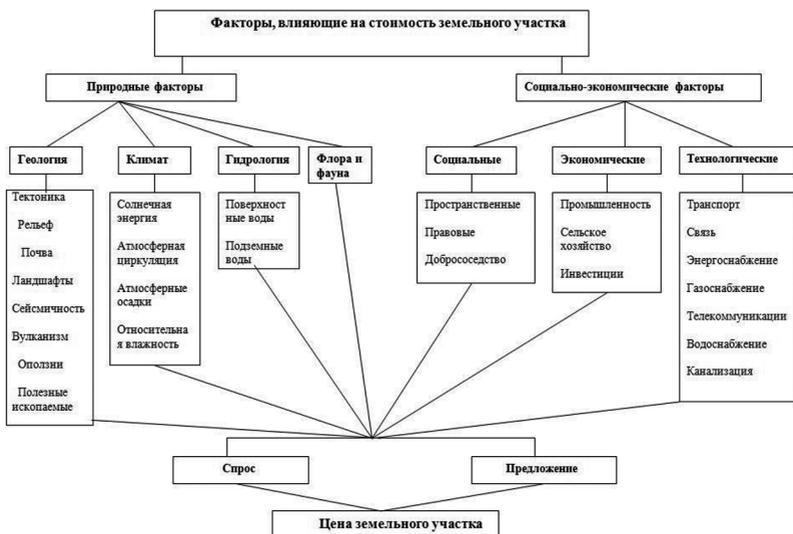


Рис. 3. Схемы факторов, влияющих на рыночную стоимость недвижимости

Состояние рынка недвижимости также играет критическую роль в определении цен. Спрос и предложение соотносятся между собой и могут оказывать мгновенное воздействие на рыночные цены. В периоды повышения ипотечных ставок активность на рынке снижается, что приводит к уменьшению цен на жилье. Макроэкономическая ситуация в стране в целом, включая уровни безработицы и инфляции, также сказывается на положении дел на рынке недвижимости [5].

В целом, формирование рыночной стоимости недвижимости представляет собой динамичный процесс, в котором участвует множество взаимосвязанных факторов. От правильного учета всех этих элементов зависят не только успешность продаж на рынке, но и долгосрочная стратегия инвестирования в недвижимость.

Интересно, что несмотря на резкое снижение спроса, цены на жилье продолжают расти. В 2024 году рост цен на новостройки со-

ставил 9,3 %, а на вторичное жилье – 4,2 % [5]. По мнению аналитиков, резкого обвала цен не ожидается, хотя рынок может испытывать значительные колебания. В условиях основного кредитования при ставке 21 % ипотечное кредитование продолжает сокращаться, однако многие покупатели, несмотря на высокие проценты, все же берут на себя долговые обязательства.

Важно отметить, что инвестиции в земельные участки и развитие инфраструктуры могут создать предпосылки для потенциального роста. Эксперты считают, что хотя в 2025 году рынок будет характеризоваться низким спросом, однако резких понижений цен не предвидится. Ожидается, что спрос на аренду объектов недвижимости также может вырасти в условиях нестабильного рынка. Существующий отложенный спрос может поддержать рынок, однако для этого необходимо дальнейшее развитие сельской и городской инфраструктуры.

Кроме того, в условиях сегодняшней экономической ситуации важными остаются факторы, влияющие на формирование рыночной стоимости недвижимости. К ним относятся не только экономические, но и социальные и экологические факторы. Например, уровень доходов населения, наличие рабочей силы, качество социальной инфраструктуры – все это оказывает влияние на интерес покупателей и арендаторов. Прогнозы о том, как будет развиваться экономическая среда и каковы будут изменения в законодательстве, могут стать определяющими при анализе и оценке рыночной стоимости объектов недвижимости.

Следует также учитывать, что будущее рынка недвижимости в России напрямую связано с общим состоянием экономики страны. В условиях кризиса и повышения ставок многие покупатели начинают рассматривать альтернативы – инвестиции в зарубежную недвижимость, что также может снизить общий спрос на российский рынок [6].

Факторы, влияющие на формирование рыночной стоимости, включают не только экономические условия, но и социальные, экологические и правовые аспекты. Например, изменения в законодательстве, касающиеся налогообложения и регулирования рынка недвижимости, могут существенно повлиять на спрос и предложение. Важно также учитывать процессы оспаривания кадастровой стоимости, которые

становятся все более актуальными в условиях растущей прозрачности рынка и повышения интереса со стороны собственников недвижимости к справедливой оценке их активов.

Кадровые ресурсы в оценочной деятельности играют ключевую роль в обеспечении качества и достоверности оценок. В условиях изменений на рынке недвижимости необходимо повышать квалификацию оценщиков, внедрять новые образовательные программы и стандарты, а также развивать профессиональные сообщества, которые смогут обмениваться опытом и лучшими практиками.

В заключительных замечаниях касательно будущего рынка недвижимости можно отметить, что ожидаемые изменения требуют от всех участников рынка, включая оценщиков, более глубокого понимания экономических процессов и готовности к адаптации. Важно, чтобы оценщики не только следили за текущими тенденциями, но и предсказывали возможные изменения, что позволит им оставаться конкурентоспособными и предоставлять качественные услуги своим клиентам [6].

Таким образом, теоретические основы оценки рыночной стоимости недвижимости в условиях изменений на рынке, ожидаемых в 2024–2025 годах, требуют комплексного подхода, учитывающего множество факторов и методов. Это позволит не только более точно оценивать стоимость объектов недвижимости, но и способствовать развитию рынка в целом, что, в свою очередь, будет способствовать устойчивому экономическому росту и повышению качества жизни населения.

### Литература

1. Асаул А. Н. Оценка недвижимости : учебник для вузов / А. Н. Асаул, М. А. Загоруйко, Т. Г. Дружинина. – Санкт-Петербург : АНО «ИПЭВ», 2019. – 352 с.
2. Басовский Л. Е. Экономическая оценка инвестиций : учебное пособие / Л. Е. Басовский, Е. Н. Басовская. – Москва : ИНФРА-М, 2018. – 240 с.
3. Рынок недвижимости в 2024 г. Прогнозы и сценарии. 2024 г.
4. Федотова М. А. Оценка стоимости имущества : учебник / М. А. Федотова. – Москва : Финансы и статистика, 2016. – 448 с.
5. Рынок недвижимости 2024–2025: что будет с ценами? 2024 г.
6. Щербакова Н. А. Оценка стоимости предприятия (бизнеса) : учебное пособие / Н. А. Щербакова. – Москва : КноРус, 2017. – 240 с.

## **Секция «Информационные технологии и математическое моделирование»**

УДК 519.873

*Наталья Павловна Фот,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Оренбургский государственный  
университет)  
*E-mail: fotnp@mail.ru*

*Nataliia Pavlovna Fot,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Orenburg State  
University)  
*E-mail: fotnp@mail.ru*

### **МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МЕТРОЛОГИЧЕСКОЙ НАДЕЖНОСТИ**

#### **METHODS OF MATHEMATICAL MODELING IN THE STUDY OF METROLOGICAL RELIABILITY**

В статье обоснована актуальность оценивания метрологической надежности, имеющей отличительные особенности от классических подходов теории надежности, методами математического моделирования. Проблема отсутствия данных за длительный временной период, выступающих в качестве характеристик метрологической надежности, может быть решена методами восстановления пропусков. В качестве приоритетного метода выбран гибридный, позволяющий сочетать различные подходы по заполнению пропусков и с учетом специфики рассматриваемых данных. При моделировании относительной погрешности средств измерений (на примере поверки вискозиметров) предложено построение линейной, логарифмически-линейной, линейно-логарифмической и двойной логарифмической регрессии с последующим выбором на основе теста Рамсея.

*Ключевые слова:* метрологическая надежность, математическое моделирование, показатели надежности, относительная погрешность, регрессия.

The article substantiates the relevance of assessing metrological reliability, which has distinctive features from classical approaches to reliability theory, using mathematical modeling methods. The problem of the lack of data over a long period of time, acting as characteristics of metrological reliability, can be solved by methods of restoring omissions. A hybrid method has been chosen as a priority, which allows combining different approaches to filling in gaps, taking into account the specifics

of the data under consideration. When modeling the relative error of measuring instruments (using the example of checking viscometers), it is proposed to construct linear, logarithmic-linear, linear-logarithmic and double logarithmic regression with subsequent selection based on the Ramsey test.

*Keywords:* metrological reliability, mathematical modeling, reliability indicators, relative error, regression.

Оценка метрологической надежности, характеризующей способность измерительного оборудования или системы сохранять свои метрологические характеристики (точность, стабильность, чувствительность) в течение времени, имеет большое значение во многих критически важных отраслях, когда отклонение от жестких требований к результатам измерений может повлечь за собой не только юридические и финансовые последствия, но и привести к серьезным авариям, поломкам оборудования или даже катастрофам. Именно поэтому, оценивание метрологической надежности актуально и целесообразно, особенно в системе обеспечения единства измерений [3, 4] при принятии решений по планированию технического обслуживания, калибровки или замены оборудования, снижающих вероятность внезапных отказов.

Номенклатура показателей надежности средств измерения (СИ) и общие подходы их оценивания принципиально не отличаются от общепринятых для технических систем, что отражено в работах ученых ФГУП ВНИИМ им. Менделеева [7–9]. Однако, выделено, что процедуры оценки и моделирования метрологической надежности СИ имеют существенные особенности.

Метрологическая надежность средств измерений является обобщенным понятием, включающим стабильность, безотказность, долговечность, ремонтпригодность, при этом последние три показателя определяются в соответствии с классическими подходами теории надежности [1, 2]. Метрологическая же надежность еще зависит от стабильности и от точности измерений, а также значений используемых допусков.

Теория надежности изучает закономерности возникновения отказов, которые по своим последствиям подразделяются на полные и частичные. Частичный отказ изделия может быть функциональным, т. е. полным отказом по одной или нескольким функциям, выполняемым

средством измерения, что может привести к снижению производительности, простоям, затратам на ремонт и т. д. Поэтому такие частичные отказы, как и полные, называют отказами функционирования. Но частичные и полные отказы могут иметь и другие последствия, заключающиеся в отклонении хотя бы одного параметра изделия за пределы, установленные нормативно-технической документацией. При таких видах отказов ухудшается качество функционирования.

Таким образом, влияние на качественные показатели и являются главным отличием функциональных от параметрических отказов (когда происходит выход значений одного или нескольких параметров технологического процесса за пределы), что делает приемы классической теории надежности для оценки метрологической надежности неэффективной. И требуется разработка специального подхода, учитывающего специфику СИ.

Подходы к моделированию одного из показателей метрологической надежности  $R(t)$  – вероятности безотказной работы, довольно широко представлены в [10]. Математическая модель дрейфа  $R(t)$ , как правило, строится по статистическим данным результатов калибровки (поверки) СИ, с учетом предельно допускаемой погрешности или целевой неопределенности [7]. Однако, на практике существует сложность моделирования данного показателя – возникает необходимость в большом количестве экспериментальных данных за длительный период. Кроме того, на сегодняшний день, часть показателей, характеризующих метрологическую надежность, имеют большое количество пропусков вследствие отсутствия единого подхода к хранению и обработке данной информации.

Исходными данными для построения математической модели, позволяющей прогнозировать показатели метрологической надежности, может выступить информация, вносимая в протокол, оформляемый при поверке средств измерений – абсолютная погрешность, относительная погрешность, пределы допустимой погрешности и т. п. Эта информация, как правило, имеется и хранится в организациях, осуществляющих поверку (калибровку) – метрологических службах предприятия, центрах метрологии и стандартизации и т. п., а также может вноситься во ФГИС «Аршин» – Федеральную государственную информационную систему Росстандарта [6].

Так, при наличии данных по результатам поверки вискозиметров [3] (относительная погрешность, исходная постоянная, полученная постоянная, диаметр) за продолжительный период времени, математическая модель может быть представлена в следующем виде:

$$\begin{aligned} f(x_1, \dots, x_k, \beta_0, \dots, \beta_k) = \\ = \beta_0 \psi_0(x_1, \dots, x_k) + \beta_1 \psi_1(x_1, \dots, x_k) + \dots + \\ + \beta_k \psi_k(x_1, \dots, x_k) + \varepsilon(x_1, \dots, x_k) \end{aligned} \quad (1)$$

где  $f$  – функция регрессии;  $\psi_i(x_1, \dots, x_k)$  –  $i$  элемент линейно независимых базисных функций;  $\beta_i$  –  $i$ -ый коэффициент функции регрессии;  $\varepsilon$  – случайная ошибка модели.

В качестве результативного признака выступает показатель «Относительная погрешность», в качестве факторных переменных – показатели «Исходная постоянная», «Полученная постоянная», «Диаметр». Прогнозирование показателя «Относительная погрешность» может стать важной составляющей при моделировании показателей, характеризующих метрологическую надежность, таких как вероятность безотказной работы и интенсивность отказов. Учитывая информацию о возможных видах законов распределения показателей надежности, целесообразным представляется построение линейной, логарифмически-линейной, линейно-логарифмической и двойной логарифмической регрессии с последующим выбором наиболее полно описывающей модели, используя тест Рамсея (Reset-тест). Однако, перед построением данных моделей важным этапом является заполнение пропусков значений во временных рядах с целью улучшения качества анализа и прогнозирования. Сегодня существует множество методов для заполнения пропусков и выбор зависит от характера данных, природы пропусков и целей анализа. Проведем обзор некоторых из них:

1. Простое заполнение:

- заполнение константой: пропущенные значения заменяются на некоторую константу (например, 0);
- заполнение предыдущим/следующим значением;
- forward fill: пропуски заполняются последним известным значением;

– dackward fill: пропуски заполняются следующим известным значением;

– интерполяция: линейная, полиномиальная, интерполяция сплайнами.

2. Статистические методы:

– Заполнение средним/медианой/модой;

– метод скользящего среднего;

– метод экспоненциального сглаживания.

3. Методы на основе построения математических моделей:

– регрессия;

– временные ряды (ARIMA, SARIMA);

– методы машинного обучения: k-ближайших соседей (KNN); методы на основе ансамблей (Random Forest, Gradient Boosting); нейронные сети.

4. Многомерные методы:

– Методы на основе корреляции;

– Методы матричной факторизации;

– Методы на основе анализа главных компонент.

5. Гибридные методы

– Комбинация нескольких методов, например, использование интерполяции вместе с моделями машинного обучения.

Учитывая, что пропуски в данных могут вносить сильные искажения в математическую модель, этап заполнения пропусков требует значительного времени и, как правило, применения гибридных подходов. При этом, проводится проверка качества построенной математической модели на нескольких массивах данных, в которых пропуски заполнены разными способами, например, с помощью показателя DRSS, рассчитываемого на основе изменения суммы квадратов остатков в регрессионном уравнении.

На основе данных по поверке вискозиметров за 53 года, применив предложенный подход, учитывающий последовательный сбор данных, заполнение пропусков данных и подбор соответствующей модели, в качестве оптимальной для прогнозирования относительной погрешности выбрана двойная логарифмическая модель, график прогноза представлен на рисунке.

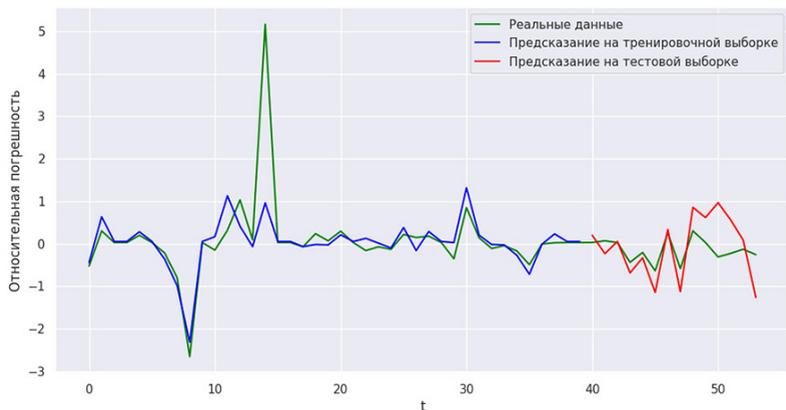


Рис. 1. Прогноз относительной погрешности при проверке вискозиметров

Предпочтительность данной модели подтвердили расчетный коэффициент детерминации  $R^2$  и тест Рамсея, отвергающий нулевую гипотезу о неправильной спецификации модели.

Таким образом, при моделировании показателей надежности средств измерений целесообразным представляется формирование исходных данных для анализа на основе протоколов поверки (калибровки), размещенных в Федеральной государственной информационной системе Росстандарта. В случае наличия пропусков в данных за определенный временной период – применение гибридных подходов по их заполнению с дальнейшим построением одной из известных моделей регрессии и выбором наиболее предпочтительной для дальнейшего использования. Реализация предложенного подхода может лечь в основу создания системы оценки метрологической надежности, базирующейся на современных информационных технологиях, методах машинного обучения и нейросетевом моделировании.

#### Литература

1. ГОСТ Р 27.102-2021 Надежность в технике. Надежность объекта. Термины и определения. – М. : Российский институт стандартизации, 2021. – 36 с.
2. ГОСТ Р 50779.27-2017 (МЭК 61649:2008). Статистические методы. Распределение Вейбулла. Анализ данных. – М. : Стандартинформ, 2017. – 62 с.

3. МИ 3630-2021. Демьянов А. А., Неклюдова А. А., Лесенная И. В., Лернер Н. А., Лернер Е. С. Государственная система обеспечения единства измерений. Вискозиметры стеклянные капиллярные эталонные. Методика поверки. – СПб. : ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева», 2020. 26 с.

4. Российская Федерация. Законы. Об обеспечении единства измерений (с изменениями и дополнениями): Федеральный закон № 102-ФЗ [принят Государственной думой 11 июня 2008 года; одобрен Советом Федерации 18 июня 2008 года]. – Москва. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_77904/?ysclid=lp1lotcpg224487343](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_77904/?ysclid=lp1lotcpg224487343) (дата обращения: 25.11.2024).

5. Российская Федерация. Распоряжения Правительства. Об утверждении Стратегии обеспечения единства измерений в Российской Федерации до 2025 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации № 737-р [утверждено Председателем Правительства Российской Федерации Д. Медведевым]. – Москва. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: <https://www.consultant.ru/law/hotdocs/49409.html?ysclid=lp12mviddu900026959> (дата обращения: 25.11.2024).

6. Российская Федерация. Постановления Правительства. О федеральных государственных информационных системах, обеспечивающих предоставление в электронной форме государственных и муниципальных услуг (осуществление функций): Постановление Правительства Российской Федерации № 861 от 24.10.2011 (ред. от 07.12.2024) Москва. – [Электронный ресурс] – Режим доступа: URL: [https://www.consultant.ru/document/cons\\_doc\\_LAW\\_120963/](https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_120963/) (дата обращения: 15.01.2025)

7. Сулаберидзе В. Ш. Метрологическая надежность средств измерений: учебно-методическое пособие / В. Ш. Сулаберидзе, А. А. Неклюдова, В. А. Михеев; ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева». – Санкт-Петербург : Реноме, 2023. – 136 с.

8. Неклюдова А. А., Сулаберидзе В. Ш. Научно-методические основы метрологического обеспечения современных методов измерений вязкости жидких сред: монография. – СПб. : Издательско-полиграфическая компания «КОСТА», 2023. – 232 с. ISBN 978-5-91258-497-8.

9. Фридман А. Э. Теория метрологической надежности средств измерений и других технических средств, имеющих точностные характеристики: дисс. д-ра техн. наук. – Техническая библиотека ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1994. – 425 с. – Инв. № 7195-5/243-4.

10. NCSLI. Recommended Practice RP-1. Establishment and Adjustment of Calibration Intervals. 2010. – 171 p.

**УДК 004.896**

*Денис Дмитриевич Кабайлов,*  
руководитель направления разработки,  
аспирант

(ООО «РЛ Проект», Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-  
строительный университет)

*E-mail: denis2000kab@gmail.com,*  
*ORCID: 0009-0006-5738-8837*

*Алексей Михайлович Наместников,*  
д-р техн. наук, доцент,  
профессор

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный  
университет)

*E-mail: am.namestnikov@gmail.com,*  
*ORCID: 0000-0003-2912-7278*

*Denis Dmitrievich Kabailov,*  
head of the development department,  
postgraduate student

(«RL Project» LLC, Saint Petersburg State  
University of Architecture  
and Civil Engineering)

*E-mail: denis2000kab@gmail.com,*  
*ORCID: 0009-0006-5738-8837*

*Alexey Michailovich Namestnikov,*  
Dr. Sci. Tech., Associate Professor,  
Professor

(Saint Petersburg State  
University of Architecture  
and Civil Engineering)

*E-mail: am.namestnikov@gmail.com*  
*ORCID: 0000-0003-2912-7278*

**КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
ИНФОРМАЦИОННОЙ МОДЕЛИ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОГО  
АЛГОРИТМА NODE2VEC**

**INFORMATION MODEL ELEMENTS CLASSIFICATION  
USING THE NODE2VEC NEURAL NETWORK  
ALGORITHM**

В данной статье описан подход к классификации элементов информационных моделей зданий на основе представления их в виде графов. Используется алгоритм *Node2Vec* для вычисления эмбедингов узлов и последующей классификации с помощью *RandomForestClassifier*. Оптимизированы гиперпараметры  $p$  и  $q$  для повышения точности предсказаний. Проведено тестирование классификации узлов по меткам с разными типами видов (план, разрез, фасад и др.). Выявлены такие ограничения метода, как невозможность использования обученной модели в предсказании на новых графах с сохранением семантического пространства и необходимость учета расстояний между элементами через веса ребер. Дальнейшие исследования направлены на улучшение модели.

*Ключевые слова:* графы, *Node2Vec*, классификация узлов, *RandomForestClassifier*, эмбединги узлов, информационные модели зданий, машинное обучение.

This article describes an approach to classifying elements of building information models based on their representation in the form of graphs. The *Node2Vec* algorithm is used to calculate node embeddings and subsequent classification using *RandomForestClassifier*. Hyperparameters  $p$  and  $q$  have been optimized to improve the accuracy of predictions.

The classification of nodes by labels with different types of views (plan, section, facade, etc.) has been tested. The limitations of the method are revealed, such as the impossibility of using the trained model in predicting on new graphs while preserving semantic space and the need to take into account the distances between the elements through the weights of the edges. Further research is aimed at improving the model.

*Keywords:* graphs, *Node2Vec*, nodes classification, *RandomForestClassifier*, node embeddings, building information models, machine learning.

Основываясь на исследованиях, проведенных в предыдущих статьях, сформирована следующая идея – для того, чтобы решить задачу классификации элементов модели по отображению на том или ином типе вида, необходимо представлять все информационные модели зданий в виде графов, так как вычислительная машина должна «понимать», что взаимосвязи между подаваемыми элементами для обучения важны. Учитывая определенные топологические зависимости между элементами здания, т. е. между узлами графа, обученная модель сможет предсказать метку узла, где 1 – элемент должен быть отображен на виде определенного типа, а 0 – не должен соответственно.

Задача определения метки узла графа схожа с задачей определения смысла слова в тексте, которая может быть решена с использованием нейросетевого алгоритма *Word2Vec*, представляющего слова в виде векторов в едином векторном пространстве. После вычисления эмбедингов всех слов относительно их соседей, обучается специальная модель, которую в дальнейшем применяют для определения смысла новых слов в других контекстах [1]. Для предсказания метки узла в данной работе используется подобный алгоритм под названием *Node2Vec*, но в качестве слов передаются узлы графа. *Node2Vec* также позволяет вычислять эмбединги узлов относительно соседей, посещая каждый соседний узел в зависимости от значений гиперпараметров  $p$  и  $q$ , выстраивая тем самым цепочку. После чего строятся топологические связи путем расположения каждого узла в определенном векторном пространстве в определенном месте [2].

Преимущество использование данного подхода в том, что, при создании нового узла, есть возможность определить его расположение в обученном векторном пространстве и сделать предсказание метки.

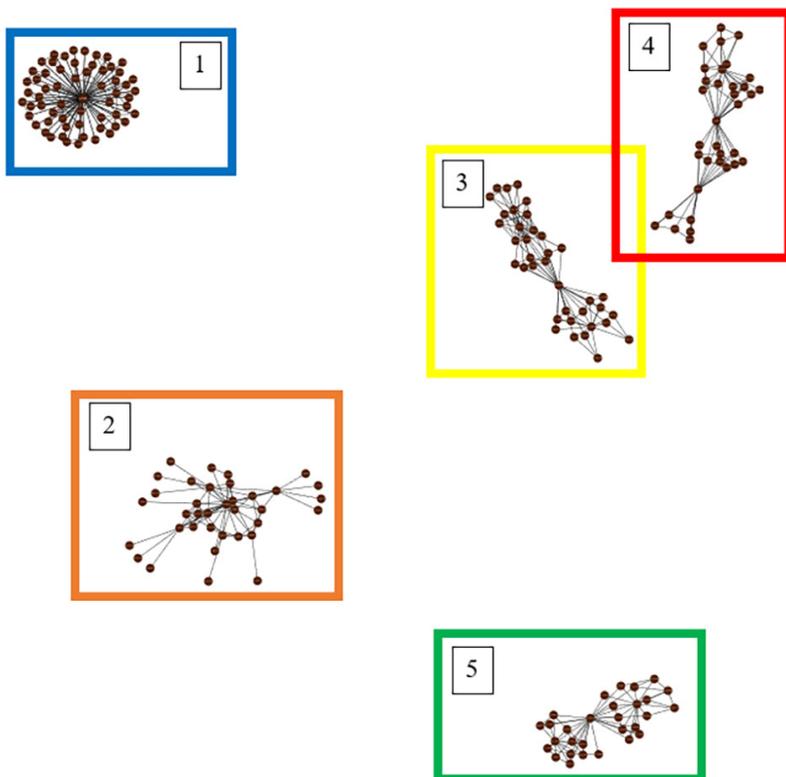


Рис. 1. Созданные графы на основе тестовых информационных моделей

Для начала необходимо подготовить графы – создать узлы, идентификаторами которых будут служить идентификаторы соответствующих элементов цифровой информационной модели, настроить связи, создать метки. Для этого используется модуль `networkx`\* и среда разработки `jupyter`†. Далее необходимо создать экземпляр класса `Node2Vec`, используя модуль `node2vec`. Стоит учесть, что существует несколько

ко реализация используемого алгоритма. В данной работе используется реализация алгоритма, описанного авторами в статье [3]. Также для создания экземпляра объекта *Node2Vec*, необходимо создать единый граф, поэтому было принято решения всем узлам присвоить префиксы во избежание повторений идентификаторов в разных моделях (рис. 1). Как можно видеть на рисунке 1, получившиеся графы очень хорошо отражают реальные связи между элементами здания – там, узел, являющийся перекрытием, имеет много связей, так как колонны, балки и стены примыкают к плите либо снизу, либо сверху.

После настройки меток, создания графа и экземпляра *Node2Vec* необходимо натренировать модель и получить эмбединги. Статичными были выбраны следующие атрибуты модели:

1. Размерность вектора эмбедингов, равная 64;
2. Количество посещаемых соседних узлов, равное 10;
3. Количество случайных блужданий, равное 500.

Далее необходимо обучить определенные классификаторы, причем классификаторов должно быть столько же, сколько типов видов. В процессе изучения были определены следующие типы:

1. План – порядковый номер «0»;
2. Разрез – порядковый номер «1»;
3. Фасад – порядковый номер «2»;
4. Фрагмент плана – порядковый номер «3»;
5. Сечение на основном виде – порядковый номер «4».

В качестве типа классификатора выбран *RandomForestClassifier*, как один из самых эффективных и надежных в задаче классификации элементов по меткам [4].

Чтобы классификаторы предсказывали метки с максимальной достоверностью, необходимо подобрать оптимальные гиперпараметры  $p$  и  $q$ . Так как сочетаний значений бесчисленное множество, то был выбран фиксированный массив следующих значений [0.25, 0.5, 1, 2] для каждого гиперпараметра соответственно. Во время выполнения очередного цикла тестовые и тренировочные данные перемешиваются случайным образом и разделяются на обучающую и тестовую выборку в следующем соотношении: 80% составляет тестовая выборка, 20% – тренировочная. По результатам подбора зафиксированы результаты гиперпараметров  $p$  и  $q$  (рис. 2).

Лучшие параметры для типа 0:  $p=0.5$ ,  $q=0.5$  (Accuracy=0.96)  
Лучшие параметры для типа 1:  $p=0.25$ ,  $q=1$  (Accuracy=0.81)  
Лучшие параметры для типа 2:  $p=0.25$ ,  $q=0.25$  (Accuracy=1.00)  
Лучшие параметры для типа 3:  $p=0.25$ ,  $q=0.5$  (Accuracy=0.96)  
Лучшие параметры для типа 4:  $p=0.25$ ,  $q=0.25$  (Accuracy=0.95)

Рис. 2. Зафиксированные значения гиперпараметров для каждого классификатора

Однако в процессе работы были выявлены следующие трудности:

1. Для предсказания меток элементов абсолютно новой модели с новыми узлами необходимо все узлы отображать в том же векторном пространстве, в котором находится обученная модель, что невозможно, так как семантическое пространство будет отличаться. Возможно, в качестве решения нужно рассмотреть нынешний подход совместно с графовыми нейронными сетями, как это представлено в статье [5];

2. На данный момент модель не учитывает расстояние между элементами, что крайне важно, так как плотность расположения элементов определяет наличие или отсутствие уточняющего вида, поэтому необходимо учитывать эти данные между узлами.

По окончании проделанной работы можно сформировать следующие выводы:

1. Создан единый несвязный граф, включающий все подграфы-модели, узлы которых имеют уникальные идентификаторы в контексте всего графа;

2. Определены оптимальные гиперпараметры  $p$  и  $q$  для модели *Node2Vec*, при которых классификаторы *RandomForestClassifier* каждого типа видов выдают максимальную точность;

3. Выявлена необходимость в решении, которое позволило бы рассматривать новый граф в том же векторном пространстве, в котором находится обученная модель;

4. Выявлена необходимость включения дополнительной информации в виде веса ребер для учета расстояния между узлами.

### Литература

1. *Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J.* Efficient estimation of word representations in vector space. URL: <https://arxiv.org/pdf/1301.3781> (дата обращения 28.02.2025).
2. Maxime Labonne Hands-On Graph Neural Networks Using Python: Livery Place, 35 Livery Street, Birmingham, B3 2PB, UK, Packt Publishing, 2023. P. 49–65.
3. *Grover A., Leskovec J.* node2vec: Scalable Feature Learning for Networks. ACM SIGKDD International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (KDD). 2016. DOI: <https://doi.org/10.1145/2939672.2939754>.
4. Pal, Mahesh Random forest classifier for remote sensing classification. International Journal of Remote Sensing – INT J REMOTE SENS. Vol. 26. P. 217–222. DOI: 10.1080/01431160412331269698.
5. *Przybyzewski J., Malawski M., Licholai S.* GraphTar: applying word2vec and graph neural networks to miRNA target prediction. BMC Bioinformatics. 2023. Vol. 24. № 1. P. 436. DOI: 10.1186/s12859-023-05564-x. EDN: KMCRC D.

**УДК 517.9**

*Александр Павлович Елсаков,*  
ассистент  
*Вера Борисовна Смирнова,*  
д-р физ.-мат. наук, профессор  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный  
университет)  
*E-mail: elsakov982@inbox.ru,*  
*smirnova\_vera\_b@mail.ru*

*Alexander Pavlovich Elsakov,*  
assistant lecturer  
*Vera Borisovna Smirnova,*  
Dr. Sci. Phys.-Math., Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture  
and Civil Engineering)  
*E-mail: elsakov982@inbox.ru,*  
*smirnova\_vera\_b@mail.ru*

**ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕХОДНОГО ПРОЦЕССА  
СИСТЕМ МАЯТНИКОВОГО ТИПА**

**PECULIARITIES OF TRANSIENT REGIME  
OF PENDULUM-LIKE SYSTEMS**

В статье рассматривается асимптотическое поведение систем непрямого управления с периодическими нелинейностями. Такие системы обладают, как правило, счетным множеством положений равновесия. Их часто называют системами синхронизации или системами маятникового типа. Устойчивость системы маятникового типа определяется как стремление любой ее траектории к какому-либо положению равновесия. В связи с этим возникает задача о расстоянии между положением равновесия, «вблизи» которого начинается траектория, и ее предельным положением равновесия. В статье получены оценки этого расстояния. Результаты сформулированы в терминах частотной характеристики линейной части системы.

*Ключевые слова:* системы маятникового типа, глобальная асимптотическая устойчивость, число проскальзываний циклов.

The article considers the asymptotic behavior of indirect control systems with periodic nonlinearities. Such systems usually have a countable set of equilibria. They are often called synchronization systems or pendulum-like systems. The stability of a pendulum-like system is defined as the convergence of any of its trajectories to a certain equilibrium. In this connection, the problem of the distance between the equilibrium near which the trajectory begins and its limiting equilibrium arises. The article obtains estimates of this distance. The results are formulated in terms of the frequency response of the linear part of the system.

*Keywords:* pendulum-like systems, gradient-like behavior, cycle-slipping.

## 1. Введение

Статья посвящена задаче, возникающей в связи с исследованием динамики систем непрямого управления с периодическими нелинейностями. Такие системы часто называют системами синхронизации или маятниковыми системами. Эти системы характеризуются счетным множеством положений равновесия как устойчивых в малом по Ляпунову, так и неустойчивых. Устойчивость систем со счетным множеством положений равновесия понимается как стремление каждого решения к какому-либо положению равновесия.

Особенность поведения устойчивых систем синхронизации состоит в том, что траектория, начавшаяся вблизи области притяжения одного положения равновесия, может через определенный промежуток времени войти в область притяжения другого положения равновесия, к которому и будет сходиться. Возникает задача об оценке расстояния между этими двумя положениями равновесия. Расстояние измеряют, как правило, с помощью периода нелинейности, определяя, сколько циклов траектория «проскочила», прежде чем она попала в область притяжения предельного положения равновесия.

Впервые данная задача, названная задачей о числе проскальзываний циклов, рассматривалась в монографии [1] в применении к математическому маятнику, где оценивалось число оборотов маятника около точки подвеса.

Задача о числе проскальзываний циклов является «продолжением» задачи об устойчивости. На нее естественно распространяются методы изучения устойчивости. Предпочтение при этом отдается качественным методам, приводящим к математически достоверным результатам.

Наиболее распространенными и эффективными в исследовании устойчивости систем управления являются прямой метод Ляпунова и метод априорных интегральных оценок Попова. Они приводят к результатам, сформулированным в терминах передаточной функции линейной части системы, в виде частотных неравенств с варьируемыми параметрами.

Первой работой, в которой были получены частотные оценки числа проскальзываний циклов, была статья [2]. В ней рассматривалась система обыкновенных дифференциальных уравнений

и применялся метод Ляпунова. В монографии [3] с помощью метода Попова результаты статьи [2] распространены на интегро-дифференциальное уравнение Вольтерра. В статье [4] методом Попова получено улучшение оценок статьи [3]. В данной статье улучшенные оценки статьи [4] применяются к системам обыкновенных дифференциальных уравнений.

## 2. Постановка задачи

Рассмотрим систему дифференциальных уравнений с периодической нелинейностью

$$\begin{aligned} \frac{dz(t)}{dt} &= Az(t) + b\varphi(\sigma(t)) \in \mathbb{R}^n, \\ \frac{d\sigma(t)}{dt} &= c^T z(t) + \rho\varphi(\sigma(t)) \in \mathbb{R} \quad (t > 0). \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $A$  – постоянная  $n \times n$ - матрица,  $b$  и  $c$  – постоянные  $n$  – векторы, символом  $T$  обозначена операция транспонирования,

$$\varphi(\sigma + \Delta) = \varphi(\sigma) \quad (\Delta > 0). \quad (2)$$

Предполагается что матрица  $A$  гурвицева, функция  $\varphi \in C^1$  и имеет на периоде  $[0, \Delta]$  два нуля:  $0 \leq \sigma_1 < \sigma_2 < \Delta$ .

Передаточная функция линейной части системы (1) от входа  $\varphi$  к выходу  $(-\dot{\sigma})$  имеет вид

$$K(p) = -\rho + c^T (A - pE_n)^{-1} b.$$

Система (1), (2) имеет счетное множество положений равновесия вида

$$(z_{eq}, \sigma_{eq}) : \{z_{eq} = 0, \sigma_{eq} = \sigma_j + \Delta k \quad (j = 1, 2; k \in \mathbb{Z})\}.$$

**Определение 1.** [5] Говорят, что система (1) глобально асимптотически устойчива, если любое ее решение стремится к какому-либо положению равновесия.

**Определение 2.** [1] Говорят, что решение глобально асимптотически устойчивой системы проскальзывает  $k$  циклов, если существует такое значение  $t_0 > 0$ , что

$$|\sigma(0) - \sigma(t_0)| = \Delta k,$$

но

$$|\sigma(0) - \sigma(t)| < \Delta(k+1), \forall t \in \mathbb{R}.$$

Цель данной статьи – установить оценки числа проскальзываний циклов для решений системы (1), (2).

### 3. Частотные оценки числа проскальзываний циклов

Пусть

$$|\varphi(\sigma)| \leq m, |\varphi'(\sigma)| \leq \alpha.$$

Пусть заданы начальные значения  $z(0)$  и  $\sigma(0)$  решения системы (1), (2).

Воспользуемся результатами работы [4]. Сведем систему (1), (2) к интегро-дифференциальному уравнению Вольтерра:

$$\dot{\sigma}(t) = \sigma_0(t) + \rho\varphi(\sigma(t)) - \int_0^t \gamma(t-\tau)\varphi(\sigma(\tau))d\tau, \quad (3)$$

где

$$\sigma_0(t) = c^T e^{At} z(0), \gamma(t) = c^T e^{At} b.$$

Следуя [4], обозначим  $\varphi(\sigma(t))$  через  $\eta(t)$  и рассмотрим функционалы

$$I(\Theta; \varepsilon, \tau) = \int_0^\Theta \left\{ 2(\varepsilon + \tau) \int_0^t \gamma(t-\tau)\eta(\tau)d\tau - (1 + 2(\varepsilon + \tau)\rho)\eta(t) - (\varepsilon + \tau)\sigma_0(t) \right\} \sigma_0(t) dt,$$

где  $\varepsilon$  и  $\tau$  – положительные параметры. В силу гурвицевости матрицы  $A$ , функционал  $I(\Theta; \varepsilon, \tau)$  равномерно ограничен по  $\Theta$ :

$$|I(\Theta; \varepsilon, \tau)| \leq Q(\varepsilon, \tau) \quad (4)$$

Чтобы построить оценки числа проскальзываний, нам понадобятся функции

$$\Phi(\sigma) = \sqrt{1 - \alpha^{-2} (\varphi'(\sigma))^2}$$

$$\Pi(\omega; \varepsilon, \tau) = \operatorname{Re} K(i\omega) - (\varepsilon + \tau) |K(i\omega)|^2 + \tau \alpha^{-2} \omega^2,$$

$$r_j(x; k, \varepsilon, \tau) = \frac{\int_0^\Delta \varphi(\sigma) d\sigma + (-1)^j \frac{x}{k}}{\int_0^\Delta |\varphi(\sigma)| \sqrt{\varepsilon + \tau \Phi^2(\sigma)} d\sigma} \quad (j = 1, 2),$$

где  $\omega, x \in \mathbb{R}; \varepsilon, \tau \in \mathbb{R}; k \in \mathbb{N}$ .

**Теорема 1.** [4] пусть существуют такие  $\varepsilon > 0, \tau > 0$  и такое  $k \in \mathbb{N}$ , что выполнены неравенства

$$\Pi_0(\varepsilon, \tau) = \inf_{\omega \in \mathbb{R}} \Pi(\omega; \varepsilon, \tau) > \frac{1}{4} r_j^2(Q(\varepsilon, \tau); k, \varepsilon, \tau) \quad (j = 1, 2). \quad (5)$$

Тогда решение уравнения (3) стремится к одному из нулей функции  $\varphi(\sigma)$  и проскальзывает менее, чем  $(k + 1)$  циклов:

$$|\sigma(t) - \sigma(0)| < \Delta(k + 1), \quad \forall t > 0. \quad (6)$$

Из Теоремы 1 вытекает следующее утверждение.

**Теорема 2.** Если выполнены условия Теоремы 1, то система (1), (2) глобально асимптотически устойчива и ее решение с начальными значениями  $z(0), \sigma(0)$  проскальзывает менее, чем  $(k + 1)$  циклов.

Действительно, из первого уравнения системы (1) получаем

$$z(t) = e^{At} z(0) + \int_0^t e^{A(t-\tau)} b \varphi(\sigma(\tau)) d\tau. \quad (7)$$

Из гурвицевости матрицы  $A$  следует, что

$$|e^{At}| < M e^{-\kappa t} \quad (M, \kappa > 0),$$

а условия Теоремы 1 гарантируют, что

$$\varphi(\sigma(\tau)) \rightarrow 0 \text{ при } t \rightarrow +\infty.$$

Тогда интеграл, стоящий в правой части (7), стремится к 0 при  $t \rightarrow +\infty$  как свертка суммируемой и стремящийся к 0 функции [6]. Следовательно, система (1), (2) глобально асимптотически устойчива, а оценка для числа проскальзываний автоматически следует из Теоремы 1.

**4. Пример** [7]. Рассмотрим систему фазовой автоподстройки частоты (ФАПЧ) с интегрирующим фильтром (ИФ) и синусоидальной характеристикой фазового детектора. Ее уравнение имеет вид

$$\begin{aligned} \dot{z} &= -\frac{1}{T}z - \varphi(\sigma) \quad (T > 0), \\ \dot{\sigma} &= z \\ \varphi(\sigma) &= \sin \sigma - \beta \quad (\beta \in (0, 1)). \end{aligned} \tag{8}$$

Такими же уравнениями описывается движение математического маятника.

$$K(p) = \frac{1}{p + T^{-1}} \left( p = \theta + i\omega, i^2 = -1, \theta, \omega \in \mathbb{R} \right)$$

Обозначим  $T^{-1}$  через  $a$  и сведем систему (8) к интегро-дифференциальному уравнению

$$\dot{\sigma}(t) = z(0)e^{-at} - \int_0^t e^{-a(t-\tau)} \varphi(\sigma(\tau)) d\tau \quad (t > 0).$$

Величина  $Q(\varepsilon, \tau)$  из (4) может быть определена следующим образом:

$$\begin{aligned} Q(\varepsilon, \tau) &= 0.5a^{-1}(\varepsilon + \tau)z^2(0) + \\ &+ a^{-1}(1 + \beta)|z(0)| \left( 1 + a^{-1}(\varepsilon + \tau) \right). \end{aligned}$$

Два неравенства (5) можно заменить одним, которое после простых вычислений приобретает вид

$$\inf_{\omega \geq 0} \left\{ \tau \omega^2 + \frac{1 - \varepsilon - \tau}{a^2 + \omega^2} \right\} > \frac{\left( 2\pi\beta + \frac{Q}{k} \right)^2}{4a^2 \left( \int_0^{2\pi} |\sin \sigma - \beta| \sqrt{\varepsilon + \tau \sin^2 \sigma} d\sigma \right)^2} \quad (9)$$

Для проверки (9) была реализована программа в среде математической разработки Matlab. Величины  $\varepsilon$  и  $\tau$  изменялись с малым шагом при соблюдении условия  $\varepsilon + \tau < 1$ . Конечным итогом работы программы является выбор наименьшего возможного значения  $k$ , удовлетворяющего неравенству (9). Это значение (обозначим его через  $k_0$ ) и является оптимальным для оценки (6).

На рис. 1 и 2 проиллюстрирована зависимость величины  $L = k_0 + 1$  от параметра  $a = T^{-1}$  и от начального значения  $z(0) = \dot{\sigma}(0)$  при различных значениях параметра  $\beta$ .

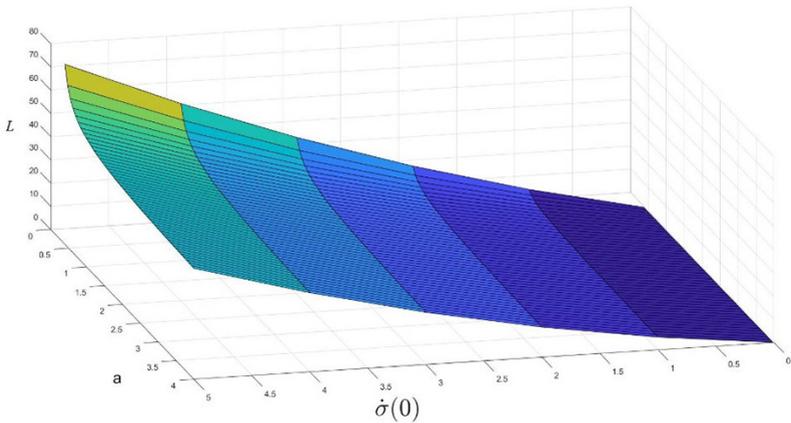


Рис. 1. Зависимость величины  $L$  от параметра  $a$  и от начального значения  $\dot{\sigma}(0)$  при  $\beta = 0.05$

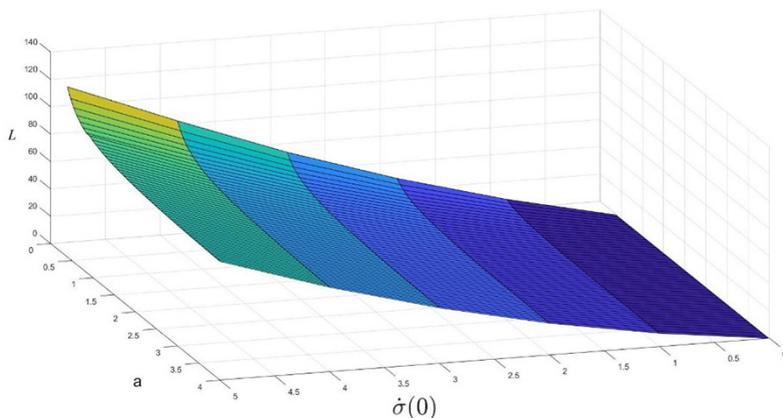


Рис. 2. Зависимость величины  $L$  от параметра  $\alpha$  и от начального значения  $\dot{\sigma}(0)$  при  $\beta = 0.1$

### Заключение

В статье исследуется поведение траекторий устойчивых систем, содержащих периодические нелинейности и имеющих счетное множество положений равновесия. Устанавливаются оценки расстояния между начальными и предельными положениями траекторий.

### Литература

1. *Stocker J. J.* Nonlinear vibration in mechanical and electrical systems. New York: Interscience, 1950.
2. *Ершова О. Б., Леонов Г. А.* Частотные оценки числа проскользываний циклов в фазовых системах автоматического регулирования // Автоматика и телемеханика. 1983. № 5. с. 65–72.
3. *Leonov G. A., Reitmann V., Smirnova V. B.* Non-local methods for pendulum-like feedback systems. Leipzig-Stuttgart: Teubner verlagsgessellschaft. 1992. 250 с.
4. *Elsakov A. P., Proskurnikov A. V., Smirnova V. B.* On cycle slipping in infinite-dimensional control systems with periodic nonlinearities. Cybernetics and physics. 2024. Т. 13, № 4, p. 281–287.
5. *Гелиг А. Х., Леонов В. А., Якубович В. А.* Устойчивость нелинейных систем с неединственным состоянием равновесия. М. : Наука. 1978. 400 с.
6. *Гелиг А. Х.* Об устойчивости нелинейной системы с бесконечным числом степеней свободы. Прикладная математика и механика. 1966. Т. 30. № 4, с. 789–795.
7. *Шахгильдян В. В., Ляховкин А. А.* Системы фазовой автоподстройки частоты. М. : Связь. 1972. 450 с.

УДК 004.4:330.322.54

Мария Юрьевна Савицкая,  
магистрант

Ольга Николаевна Яркова,

канд. экон. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

E-mail: Savitskaia27@outlook.com,  
yarkova\_on@mail.ru

Maria Yurievna Savitskaya,  
Master's degree student

Olga Nikolayevna Yarkova,

PhD in Sci. Ec., Associate Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

E-mail: Savitskaia27@outlook.com,  
yarkova\_on@mail.ru

## **ПРОГРАММНЫЙ ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ ОЦЕНКИ РИСКОВ ФИНАНСОВЫХ ИНВЕСТИЦИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ**

### **PROGRAM TOOL FOR RISK ASSESSMENT OF FINANCIAL INVESTMENTS IN CONSTRUCTION**

В статье рассматривается разработка программного решения для оценки рисков финансовых вложений. Оно обладает функцией автоматизации процесса анализа, что позволяет повысить точность предсказаний и сократить возможные временные затраты. Актуальным подходом является использование линейных регрессионных методов для прогнозирования динамики изменения стоимости объектов недвижимости, а также статистических методов анализа, таких как Value at Risk (VaR), которые оценивают вероятность финансовых потерь. Программная реализация комбинации этих методов позволит создать удобный веб-сервис для пользователей, заинтересованных в инвестициях в строительные проекты.

*Ключевые слова:* финансовые инвестиции, строительные проекты, анализ рисков, программные инструменты, моделирование, VaR.

The article deals with the development of a software solution for assessing the risks of financial investments. It has the function of automation of the analysis process, which allows to increase the accuracy of predictions and reduce possible time costs. The actual approach is the use of linear regression methods to predict the dynamics of changes in the value of real estate objects, as well as statistical methods of analysis, such as Value at Risk (VaR), which estimate the probability of financial losses. Program implementation of a combination of these methods will allow creating a convenient web service for users interested in investing in construction projects.

*Keywords:* financial investments, construction projects, risk analysis, software tools, modeling, VaR.

В нынешних реалиях сфера строительной индустрии подвержена значительным финансовым рискам, причиной которых может быть как изменение ситуации на рынке, экономическая неустойчивость, так и комплекс других факторов. Эффективное осуществление капиталовложений в развитие строительства нуждается в проведении детального риск-анализа и в применении современных методов анализа. Определение понятия «инвестиционный риск» дала в своей работе Барабанова И. Ю. – это вид предпринимательского риска, который подразумевает под собой вероятность наступления денежных убытков вследствие принимаемых финансовых решений владельцев бизнеса или отдельных лиц в период с нестабильными состояниями условий внешней среды [1]. В учебном пособии Н. В. Щукиной, О. Б. Токаревой Т. В. Секачевой, О. А. Рыжовой дается понятие инвестиций. Это имущественные (инвестирование в акции, облигации и другие финансовые инструменты строительной компании) и интеллектуальные ценности, которые в долгосрочном периоде вкладываются в строительство с целью получения максимальной выгоды (прибыли или достижения другого желаемого эффекта) [2].

Цель данной работы – анализ рисков финансовых инвестиций в строительной сфере и разработка программного решения для их оценки. Для достижения этой цели используются исторические данные о стоимости квадратного метра недвижимости в Москве за период с 2000 по 2023 годы. Эти данные были структурированы в dataset и применены для тестирования предлагаемого программного инструмента. В ходе исследования был рассчитан коэффициент повышения цены за квадратный метр (руб.), определяемый как отношение конечной стоимости к начальной (рис. 1).

Для дальнейшей работы используется алгоритм линейной регрессии – метод контролируемого машинного обучения, позволяющий находить одно линейное уравнение, характеризующее взаимосвязь между зависимыми и независимыми величинами. Этот подход позволит установить зависимость между ценой продажи и годом продажи недвижимости [3].



Рис. 1. Индекс стоимости жилья в Москве, руб./кв. м\*

Модель была обучена на предварительно обработанных данных *dataset* с использованием метода *fit*. В ходе обучения он подбирает оптимальные коэффициенты, снижая разницу между прогнозируемыми и реальными значениями целевой переменной. (рис. 2). Далее выполняется прогноз значения коэффициента повышения цены при помощи метода *predict* [4].

```
# Загрузка данных
lifesat = pd.read_csv("lifesat.csv")

# Подготовка данных для модели линейной регрессии
x = lifesat[["год"]]
y = lifesat["Коэффициент повышения цены за м² (рубли)"]

# Обучение модели линейной регрессии
model = LinearRegression()
model.fit(x.values, y)
```

Рис. 2. Обучение модели и предсказание цены

\* <https://www.irn.ru/gd/s-2000-goda/#begin/>

Для оценки финансовых рисков применяется статистический метод *Value at Risk (VaR)*. Он служит индикатором возможных потерь с заданной вероятностью за определенный период. Значение *VaR* представляет собой максимальный ожидаемый убыток, который инвестор может понести в течение установленного временного интервала с определенной степенью уверенности.

Общая формула расчета *Value at Risk* выглядит таким образом:

$$VaR = P - \left[ \Phi^{-1} \left( \frac{100 - C}{100} \right) \cdot RMSE + PG \right] \cdot P, \quad (1)$$

где *VaR* – величина риска, *P* – стоимость покупки недвижимости, *PG* – прогнозируемый коэффициент роста цены за квадратный метр, *RMSE* – среднеквадратичная ошибка модели,  $\Phi^{-1}(\ast)$  – обратная функция стандартного нормального распределения, *C* – уровень доверия.

Для создания веб-сервиса для расчета рисков использован веб-фреймворк *Flask*, который является гибким инструментом для разработки веб-приложений на языке программирования *Python* и предоставляет пользователю удобный интерфейс для взаимодействия с результатами отчета [5].

Для *frontend* разработки использован язык гипертекстовой разметки документов HTML. При помощи этого инструмента на веб-странице размещен текст, заголовки и таблицы. Также использован язык разметки CSS для описания внешнего вида и определения стиля элементов сайта. Он отвечает за цветовую гамму, размеры.

Веб-страница состоит из формы, в которой пользователь может ввести данные, необходимые для расчета инвестиционного риска и доходности.

Пользователь вводит свои данные, такие как цена покупки недвижимости, количество лет владения этой недвижимостью, уровень доверия и, при необходимости, цену аренды. Ввод данных осуществляется через текстовые поля, которые нельзя оставить пустыми. Для поля «Цена аренды» предусмотрена дополнительная возможность отображения с «Есть цена аренды». После ввода всех данных, пользователь нажимает кнопку «Рассчитать», она выполняет функцию отправки формы для получения результатов. После отправки

формы с данными на сервер запускается процесс вычисления, и возвращаются результаты, которые затем отображаются на той же странице. Результаты выводятся в виде блоков с текстовыми пояснениями. Поля с результатами расчетов отображаются только в случае успешного выполнения расчета

Для размещения сайта на хостинг выбран сервис *Timeweb*, где был развернут сервер на ОС *Ubuntu* [6].

Алгоритм работы веб-сайта:

1. При переходе по актуальной ссылке открывается сайт «Калькулятор инвестиций».

2. Пользователь вносит в поля ввода свои данные о цене покупки недвижимости и о полном количестве лет владения недвижимостью.

3. Каждый пользователь определяет для себя приемлемый уровень доверия – это вероятность, с которой потери не превысят рассчитанное значение.

4. У пользователя есть возможность включить в расчеты цену аренды и ввести конкретное число, которое будет влиять на результат вычислений.

5. После заполнения всех обязательных полей (цена покупки (руб.), количество лет, уровень доверия (%)), кнопка «Рассчитать» становится активной, и ее нажатие запускает выполнение расчетов.

6. При нажатии кнопки рассчитать, появится окно с рассчитанными значениями: предполагаемая цена продажи через указанное количество лет, среднегодовая доходность и показатель *Value at Risk (VaR)*.

В результате проделанной работы пользователь получает сайт для расчета инвестиционных рисков, который может рассчитать предполагаемую цену продажи, среднегодовую доходность и *VaR*. На основе введенных пользователем данных, получены следующие результаты (рис. 3):

1. Прогнозируемая стоимость недвижимости через 2 года, с учетом ожидаемого роста цены за квадратный метр составит 6,508,670.69 руб,

2. Средний доход, который инвестор может ожидать от вложений в недвижимость за один год равен 7.19 %.

3. Значение *VaR* указывает, что с вероятностью 99 % максимальный убыток за период в 2 года не превысит 2,245,545.06 руб.

В рамках исследования выполнена поставленная цель. Обучена модель для прогнозирования цены продажи на основе линейной регрессии. Реализованы алгоритмы расчета среднегодовой доходности и показателя *Value at Risk*. Разработан веб-сервис для анализа рисков финансовых инвестиций в строительстве. Проведено тестирование разработанного инструмента, также сервис внедрен на сервер для доступа к веб-сайту через Интернет.

Разработанный веб-сервис предоставляет удобный инструмент для анализа рисков, что особенно важно в условиях высокой динамики рынка недвижимости. Система позволяет автоматизировать ключевые процессы, снизить вероятность ошибок и повысить эффективность принятия инвестиционных решений.

**Калькулятор инвестиций**

Цена покупки (руб):  
5000000

Количество лет:  
2

Уровень доверия (%):  
99

Есть цена аренды  
40000

Рассчитать

Цена продажи: 6508670.69  
Среднегодовая доходность: 7.19%  
Value at Risk (VaR): 2245545.06

Рис. 3. Результаты работы сайта

В перспективе возможно дальнейшее расширение функционала, включая интеграцию с внешними базами данных и добавление новых метрик анализа рисков.

### Литература

1. *Барабанова И. Ю.* Финансовые риски реализации инвестиционных проектов в наукоемких отраслях промышленности // Вестник университета. – 2013. – № 1. – С. 216–220. EDN RSHZYX.
2. *Щукина Н. В., Токарева О. Б., Секачева Т. В., Рыжова О. А.* Экономика строительства. Инвестиции в строительство / Учебное пособие. – 2024. – С. 39–45. – ISBN 978-5-9948-4830-2. EDN HFPPLQ.
3. *Антонов Г. В., Иванов С. И.* Линейная регрессия как один из методов статистического исследования // Известия Великолукской государственной сельскохозяйственной академии. – 2021. – № 2(35). – С. 64–75. EDN UNIRWN.
4. *Гребнев К. Н.* Машинное обучение с помощью библиотеки scikit-learn языка Python // Математический вестник педвузов и университетов Волго-Вятского региона. – 2017. – № 19. – С. 277–281. EDN YMABJS.
5. *Полячкова М. А., Ефремова А. Н.* Flask как фреймворк для изучения основ веб-программирования // Труды Братского государственного университета. Естественные и инженерные науки. – 2021. – Т. 1. – С. 52–55. EDN ZZLELH.
6. *Павлов М. Е., Лытнев Н. Н.* Автоматизация с помощью облачных сервисов // Цифровизация экономики: направления, методы, инструменты: Сборник материалов V всероссийской научно-практической конференции, 2023. – С. 122–125. EDN WZDOIT.

УДК 004.82+69.059.4

Евгений Валерьевич Яковлев,  
канд. техн. наук, ст. науч. сотр.  
(ООО ЭРА ФПИ)  
E-mail: lk.44y@yandex.ru

Evgeniy Valnrievich Yakovlev,  
PhD in Sci. Tech., senior research worker  
LLC «ERA FPI»  
E-mail: lk.44y@yandex.ru

## ОНТОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КАК ИНСТРУМЕНТ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОГНОСТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫМ РЕСУРСОМ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

### ONTOLOGICAL MODEL IS A RESEARCH TOOL OF MANAGING THE RESIDUAL LIFE FOR CONSTRUCTION PROJECTS

В статье рассматриваются вопросы структурирования информации в предметной области прогностического управления остаточным ресурсом строительных объектов на основе онтологического подхода агрегации информации из различных источников в единую модель знаний. Полученная онтологическая модель представляет собой концептуальное описание предметной области в терминах и определениях, является основой для создания базы знаний. Исследование связей между различными понятиями, представленными в академических изданиях и нормативной литературе, облегчает анализ и интерпретацию информации. Такой подход способствует повышению качества принимаемых решений, оптимизации процессов обслуживания, ремонта, реконструкции и модернизации строительных объектов.

*Ключевые слова:* строительный объект, остаточный ресурс, онтология, модель, жизненный цикл.

The article addresses the challenges of organizing information in the field of managing the remaining service life of construction projects using an ontological approach to combining data from various sources into a single knowledge model. This approach involves creating a conceptual description of the subject area, which is expressed in terms and definitions. It also serves as the foundation for building a knowledge base. By examining the connections between different concepts presented in academic publications and regulatory documents, it becomes easier to analyze and interpret information. As a result, the quality of decisions improves, and processes related to maintaining, repairing, reconstructing, and upgrading construction projects are optimized.

*Keywords:* construction project, residual resource, ontology, model, life cycle.

Множественность различных источников фундаментального и прикладного характера, значительный объем и способы интерпретации информации, изложенной в академических изданиях и нормативной литературе, определяющих понятийный аппарат – все это усложняет составление целостного представления о средствах отбора и верификации информации в предметной области исследования управления остаточным ресурсом объекта строительства в условиях его эксплуатации.

Цель статьи является определение подходов к интеграции информации в единую структуру данных, формирование модели онтологического типа применительно к прогностическому управлению остаточным ресурсом строительного объекта. Под прогностическим управлением остаточным ресурсом строительного объекта понимается система мер, реализация которых направлена на оценку, прогнозирование и сохранение работоспособного состояния объекта на протяжении его жизненного цикла.

Достижение поставленной цели неразрывно связано с агрегированием существующих знаний в предметной области исследования на основе онтологического подхода моделирования. Такой подход позволяет систематизировать и структурировать информацию из различных источников, создавая единую картину предметной области. Сильной стороной подхода является уникальное место применения онтологии в концептуальном моделировании процессов управления сложными техническими системами превалирует принятие рациональных решений по сравнению с «интуитивными» решениями.

Значительный вклад в концептуальную разработку онтологического моделирования представления знаний отмечены в работах отечественных и зарубежных авторов: Голенков В. В., Грибова В. В., Грубер Т., Гуарино Н., Добров Б. В., Загоруйко Ю. А., Клещев А. С., Курейчик В. М., Ландэ Д. В., Ленат Д., Осипов Г. С., Пospelов Д. А., Соловьев В. Д., Штудер Р. и др.

В области искусственного интеллекта Грубером Т. [1] предложено определение онтологии, как формальной трактовки категорий свойств и отношений между понятиями, данными и сущностями предметной области или абстрактной модели из окружающего мира, которая выражается через свойства важных концептов и связей между ними.

Онтология это структурированное множество терминов, описывающих предметную область, которая может служить основой для создания базы знаний. Формально структура онтологии представляет кортеж данных [2]:

$$O = \langle T, R, F \rangle, \quad (1)$$

где  $T$  – конечное множество терминов, обозначающих объекты и понятия;  $R$  – множество отношений между понятиями предметной области;  $F$  – множество функций интерпретации, заданных на концептах и/или отношениях онтологии.

В расширенной версии определение онтологической модели представляет объект исследования предметной области на основе агрегирования информации, включает классы (понятия, сущности, концепты) и отношения между ними [3 – 5]:

$$O = \langle \text{ПБт}, K, \text{СК}, \text{П}, \text{Ок}, \text{Окс} \rangle, \quad (2)$$

где ПБт – перечень базовых типов данных;  $K$  – классы; СК – свойства классов; П – понятия предметной области; Ок – отношения наследования между классами; Окс – отношения между классами и свойствами.

Процесс создания онтологии предметной области состоит из последовательности этапов:

- определение ключевых понятий и категорий предметной области;
- классы упорядочиваются в виде древовидной структуры, устанавливаются отношения между понятиями, определяются их уровни абстракции и детализации;
- определяются связи взаимодействия между классами разного типа, например «родитель–потомок», «часть–целое», «ассоциация» и т. д.;
- определение свойств, атрибутов и характеристик каждого класса, такие как цвет, размер, форма и др.;
- создание объектов и определение их свойств для каждого класса;

- принятие вариантов решений на основе результатов исследования структурированной информации предметной области.

Приведем пример структурирования информации на основе терминов и определений предметной области управления остаточным ресурсом строительных объектов (рис. 1).

Онтология разработана в среде Protégé 5.6.4 и представляет множество связей между терминами заданной предметной области. В программе Protégé при создании модели знаний важную роль играет закладка Classes, которая отображает классы объектов в определенной предметной области. Классы и подклассы расположены в зависимости от иерархии наследования.

В соответствии с классификацией, принятой в Protégé на выборочном примере определим логику онтологического исследования в отношении роли эксплуатационных свойств и характеристик строительных конструкций относительно управления остаточным ресурсом строительного объекта.

К1 – Жизненный цикл строительного объекта: ПК1.1 – Проектирование; ПК1.2 – Строительство; ПК1.3 – Эксплуатация; ПК1.4 – Реконструкция; ПК1.5 – Демонтаж.

Исследование характеристик и эксплуатационных свойств строительных конструкций в течение жизненного цикла является ключевым аспектом при исследовании остаточного ресурса строительного объекта.

К2 – Конструкции: ПК2.1 – Дефекты, повреждения; ПК2.1.1 – Воздействия внешних факторов; ПК2.1.2 – Воздействия технологических процессов; ПК2.1.3 – Ошибки проектирования; ПК2.1.4 – Ошибки строительства; ПК2.2 – Материалы; ПК2.3 – Нагрузки; ПК2.3.1 – Временные; ПК2.3.2 – Постоянные; ПК2.4 – Несущие; ПК2.5 – Несущие и др.

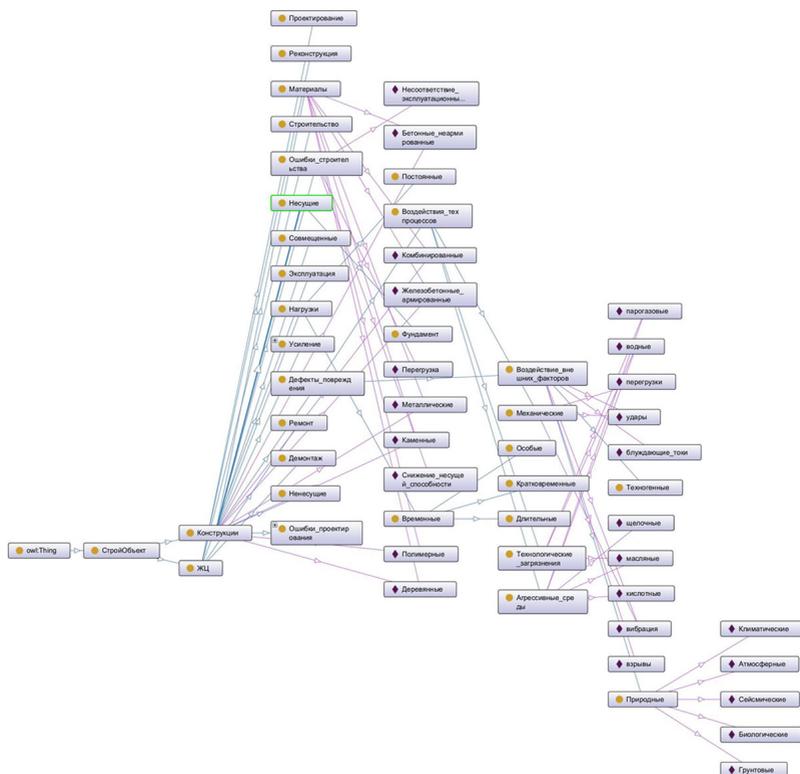


Рис. 1. Онтология предметной области в среде Protégé 5.6.4

Варианты определения свойств подклассов:

K2 – Конструкции: ПК2.1 – Дефекты, повреждения: ПК2.1.1 – Воздействия внешних факторов: ПК2.1.1С – блуждающие токи, взрывы, вибрация, удары;

K2 – Конструкции: ПК2.1 – Дефекты, повреждения: ПК2.1.2 – Воздействия технологических процессов: ПК2.1.2С – водные, кислотные, масляные, парогазовые, щелочные;

K2 – Конструкции: ПК2.2 – Материалы: ПК2.2С – бетонные, деревянные, железобетонные, каменные, комбинированные, металлические, полимерные.

Свойства классов определены следующими аксиомами (А):

А1 – Объект строительства обладает свойствами: год постройки, срок службы, текущее состояние, условия эксплуатации, проведенные мероприятия по экспертизе технического состояния, техническому обслуживанию и ремонту. А2 – Остаточный ресурс определен для всего объекта строительства на основе оценки ресурса отдельных его элементов. А3 – Техническое обслуживание включает работы: проверка технического состояния, ремонтно–восстановительные работы, ремонт текущий или капитальный. А4 – Объект строительства может иметь один или несколько конструктивных элементов, которые имеют минимальный остаточный ресурс. А5 – Проведенные мероприятия по техническому обслуживанию влияют на остаточный ресурс объекта строительства. А6 – Своевременный и качественный ремонт увеличивает остаточный ресурс объекта строительства. А7 – Оценка остаточного ресурса проводится на основе визуального осмотра, инструментального обследования, анализа исторических данных о результатах предыдущих ремонтов.

Для оценки качества создаваемой модели онтологии, предлагается рассматривать повышение эффективности управления знаниями предметной области через эмерджентность свойств таких компонент, как агрегирование информации и имитационное моделирование.

Компонент системы агрегирования информации позволяет объединить разрозненную информацию из различных источников в единую предметную область знаний.

Компонент имитационного моделирования позволяет исследовать и оценивать эффективность онтологии на основе исследования результатов имитационного поведения реальных объектов или процессов предметной области, а также прогнозирование результаты сценариев и последствия принятия решений.

Внедрение в систему искусственного интеллекта также окажет положительное влияние, начиная с агрегирования информации для сбора, обработки и анализа больших данных; на этапе создания онтологической модели позволит автоматизировать извлечение и структурирование знаний; на этапе имитационного моделирования прогнозировать результаты принятия решений.

В заключение следует отметить – агрегирование информации и формирование модели онтологической модели предметной области исследований является ключевым инструментом прогностического управления остаточным ресурсом строительного объекта, создает целостное представление о проблематике прогнозирования работоспособности объекта на протяжении его жизненного цикла.

Предполагается дальнейшее совершенствование модели путем расширения иерархии сущностей модели с определением логических связей внутри модели. Также будут рассматриваться вопросы применимости искусственного интеллекта на этапах агрегирования информации и имитационного моделирования прогностического управления остаточным ресурсом объектов строительства.

#### **Литература**

1. Thomas R. Gruber (1989). The Acquisition of Strategic Knowledge. Perspectives in Artificial Intelligence. Vol. 4. Academic Press. ISBN 9780123047540.
2. Курейчек В. М., Сафроненкова И. Б. Создание онтологической модели систем автоматизированного проектирования в среде Protege 4.2. / ИППМ РАН, МЭС–2016, М. : 2016 – 7 с.
3. Николайчук О. А. Методы, модели и инструментальное средство для исследования надежности и безопасности сложных технических систем. / Дисс. на соиск. уч. степ. д–ра техн. наук по спец. 05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации (промышленность), Иркутск, 2011 – 268 с.
4. Кравченко Ю. А., Новиков А. А., Марков В. В. Метод создания онтологии предметной области на основе глоссария. / Известия ЮФУ. Технические науки. Раздел IV. Искусственный интеллект и нечеткие системы. 2014 – С. 158–168.
5. Малых А. А., Манцивода А. В., Ульянов В. С. Логические архитектуры и объектно-ориентированный подход / Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. 2009 Т. 9, вып. 3 С. 64–85, 2009.

УДК 004.896

*Евгений Сергеевич Просвирнин,*  
аспирант  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*E-mail: ZhenyaDash@gmail.com*

*Evgeny Sergeevich Prosvirnin,*  
postgraduate student  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*E-mail: ZhenyaDash@gmail.com*

## **ПРИМЕНЕНИЕ ГИБРИДНЫХ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ СИСТЕМ ДЛЯ РАЗРАБОТКИ ПРИЛОЖЕНИЙ В СТРОИТЕЛЬНОМ ПРОЕКТИРОВАНИИ**

### **APPLICATION OF HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS IN THE DEVELOPMENT OF CONSTRUCTION DESIGN SOFTWARE**

В работе демонстрируется применение гибридных интеллектуальных систем для обработки неструктурированных данных на примере приложения для маркировки дверей. Приложение использует большие языковые модели (LLM) для обработки текстовых описаний дверей, данные из онтологий для формирования контекста в запросе к LLM, и логический вывод для генерации обозначений. Предложенный подход обеспечивает адаптивность к неструктурированным данным и сокращает время, затраченное на формирование марок (по сравнению с ручным вводом). Результаты подтверждают, что гибридные системы эффективны для работы с неструктурированными данными в строительном проектировании.

*Ключевые слова:* гибридные интеллектуальные системы, обработка естественного языка (NLP), большие языковые модели (LLM), онтологии, автоматизация проектирования.

The paper demonstrates the application of hybrid intelligent systems for processing unstructured data using a door labeling application as an example. The application employs large language models (LLMs) to process textual descriptions of doors, ontology data to shape the context of LLM queries, and logical inference to generate labels. The proposed approach ensures adaptability to unstructured data and reduces the time spent on label creation (compared to manual entry). The results confirm that hybrid systems are effective for handling unstructured data in construction design.

*Keywords:* hybrid intelligent systems, natural language processing (NLP), large language models (LLMs), ontologies, construction design automation.

## Введение

В процессе разработки строительной проектной документации проектировщикам необходимо обрабатывать большие объемы неструктурированных данных: текстовые описания элементов, нормативные документы и пр. Это приводит к тому, что архитекторам и инженерам приходится вручную наполнять элементы BIM-моделей метаданными (маркировки дверей, конструкций и пр.). Такой подход повышает риск ошибок и замедляет рабочие процессы из-за человеческого фактора.

Современные методы для формирования интеллектуальных систем, такие как символьные и субсимвольные подходы, не способны по отдельности решить вышеперечисленные задачи из-за того, что первые не являются достаточно гибкими, а вторые интерпретируемыми.

Целью статьи является исследование эффективности гибридных подходов интеллектуальных систем для решения задач строительного проектирования. В качестве примера приведено приложение для формирования марок дверей. В нем используются основные преимущества двух подходов: гибкость нейросетей и интерпретируемость онтологий.

## Методы искусственного интеллекта

Для достижения целей, которые указаны во введении, необходимо рассмотреть подходы для формирования интеллектуальных систем. Эти методы можно разделить на три группы: символьные, субсимвольные и гибридные [3]. В табл. 1 представлен сравнительный анализ символьных и субсимвольных подходов с их достоинствами и недостатками [1, 2, 8].

Таблица 1

**Сравнение символьных и субсимвольных методов**

Критерий	Символьные методы	Субсимвольные методы
Основа	Логика, правила, явные знания.	Данные, статистика, распределенные представления
Представление знаний	Строки, формулы, графы	Численные векторы, тензоры, веса нейросетей

Окончание табл. 1

Критерий	Символьные методы	Субсимвольные методы
Интерпретируемость	<b>Высокая:</b> каждый шаг вывода можно объяснить	<b>Низкая:</b> невозможно узнать причины того или иного решения
Гибкость	<b>Низкая</b>	<b>Высокая</b>
Работа с данными	Только структурированные данные	Любые данные: изображения, текст
Устойчивость к шуму	<b>Низкая:</b> ошибки в данных нарушают логику	<b>Высокая:</b> модели фильтруют шум

Для преодоления ограничений отдельных методов применяются *гибридные архитектуры с онтологиями*, объединяющие символьную точность с гибкостью нейросетей [4].

Основные *преимущества* гибридных систем заключаются в их способности сочетать сильные стороны двух подходов. Благодаря символьному компоненту они сохраняют интерпретируемость – решения остаются объяснимыми. При этом субсимвольная часть обеспечивает гибкость, позволяя обрабатывать неструктурированные данные [5–7].

*Недостатки* таких систем связаны с их сложностью. Интеграция разнородных технологий, таких как нейросети и онтологии, требует значительных временных затрат на разработку и настройку [5–7].

### Примененные технологии

Для реализации гибридной системы для маркировки дверей, были использованы следующие технологии:

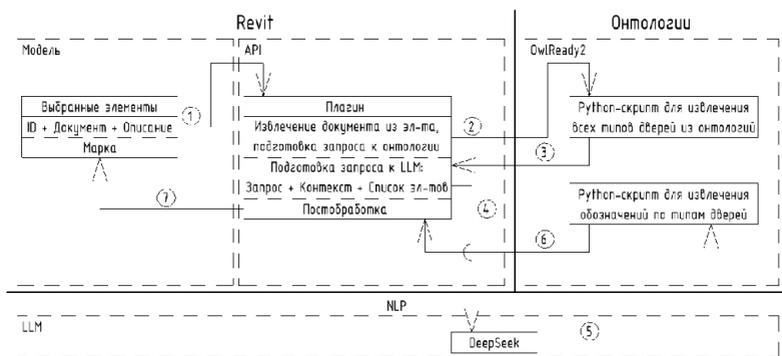
- *Protégé*: открытая платформа для разработки и визуализации онтологий. В рамках исследования этот инструмент применен для формализации пунктов ГОСТ для дверей, связанных с типами дверей и их маркировками.
- *OwlReady2*: библиотека для Python для работы с онтологиями. Она использовалась для доступа к формализованным данным в онтологиях с помощью скриптов.

- *Large Language Model (LLM)*: нейросеть для анализа и генерации текстов на естественном языке. Она используется для обработки описания дверей на естественном языке и приведения его к машиночитаемому виду.

- *Revit API*: программный интерфейс приложения Autodesk Revit. С его помощью гибридная система была интегрирована в Revit для извлечения данных из моделей (Названия документов и описания для выбранных дверей) и записи марок в соответствующие параметры.

### Архитектура приложения

Приложение для автоматизации маркировки дверей реализует гибридный подход, объединяя символьные методы (онтологии) и субсимвольные (LLM). Графическое представление работы приложения приведено на рисунке, а примеры запросов и ответов в табл. 2.



Архитектура приложения для формирования марок

Процесс начинается с запуска плагина Revit, где пользователь выбирает двери. Затем плагин автоматически извлекает из модели параметры: название документа (например, ГОСТ 23747–2014) и текстовое описание двери (например, «Дверь алюминиевая наружная, с порогом») (см. рис. 1 (п. 1)).

На следующем этапе запускается Python-скрипт для обращения к онтологиям, которые содержат в формализованном виде пункты документов (Документы и пункты документов приведены в табл. 3), для

описания типов дверей, обозначения этих типов и пр. Данная программа извлекает из онтологий все типы дверей для указанного документа, а затем возвращает результат в плагин для формирования контекста запроса к LLM. Исходными данными для скрипта являются пути расположения онтологий (см. табл. 2 и рис. 1 (п. 2 и п. 3)).

После этого LLM (в данной работе применяется DeepSeek) получает запрос, который содержит задание, контекст, сформированный на основе онтологий, и список текстовых описаний дверей. Задача модели сопоставить описания дверей со списком типов, которые получены из онтологии. Чтобы избежать ошибок модель ограничена тем, что ей разрешено предоставлять только ту информацию, которая задана явно (см. табл. 2 и рис. 1 (п. 4)).

Далее полученные свойства передаются второму Python-скрипту для поиска обозначений по онтологии. Для этого программа создаст в онтологии экземпляр двери, к которому применяются свойства, полученные в результате обработки текстового описания. После этого запускается механизм логического вывода и полученные обозначения с дополнительной информацией (порядок сортировки и знак сепаратора) передаются в плагин для постобработки (см. табл. 2 и рис. 1 (п. 5 и п. 6)).

На финальном этапе плагин Revit форматирует марку по шаблону, добавляя размеры и записывает ее в параметры двери (см. табл. 2 и рис. 1 (п. 7)).

Таблица 2

**Пример запросов и ответов**

Запрос/исходные данные	Ответ
Скрипт для извлечения всех типов дверей из онтологий	
<Путь к директории>/ГОСТ 23747-2014.owx	С _порогом; С порогом Наружный; Дверной блок из алюминиевых профилей наружный...
	Пояснение к структуре: <Тип двери>; <Расшифровка>

Окончание табл. 2

Запрос/исходные данные	Ответ
Скрипт для извлечения всех типов дверей из онтологий	
LLM	
Необходимо извлечь типы, которые приведены в списке, из описания в списке типов. Запрещено добавлять информацию, которая не указана явно... Ответ должен иметь следующую структуру... Список запросов: 2608943; Дверь наружная, с порогом... Список типов: С_порогом; С порогом...	2608943; ГОСТ 23747-2014; Наружный; С_порогом...
	Пояснение к структуре: <ID>; <Документ>; <Тип 1>; <Тип 2>;<Тип 3>...
Скрипт для извлечения обозначений по типам дверей	
Ответ LLM	2608943; ДАН;1;U+00A0; П;3;U+00A0
	Пояснение к структуре: <ID>; <Обозначение 1>;<Порядок сортировки>; <Сепаратор>...
Пост обработка	
Ответ скрипта для извлечения обозначений + данные из модели	ДАН П 2100×900 ГОСТ 23747-2014

Таблица 3

**Список документов, формализованных с помощью онтологий**

Название документа	Пункты документа
ГОСТ 23747-2014	п. 3 Классификация и условные обозначения
ГОСТ 30970-2014	п. 4 Классификация и условные обозначения
ГОСТ 31173-2016	п. 4 Классификация и условные обозначения

Окончание табл. 3

Название документа	Пункты документа
Примечание: – типы дверей являются экземплярами класса «Типы»; – обозначения типов дверей являются экземплярами класса «Обозначения»; – связь обозначений с типами обеспечена с помощью «Object properties»; – расшифровка обозначений, знак сепаратор между обозначениями и порядок в марке задано с помощью «Data Properties» (Применяется к обозначениям)	

### Заключение

На примере приложения для маркировки дверей, была подтверждена эффективность гибридных интеллектуальных систем в задачах строительного проектирования.

Совмещение символьных и субсимвольных методов позволило создать одновременно *гибкую* и *интерпретируемую* систему. Использование онтологий позволяет структурировать данные и задействовать механизмы логического вывода, а применение LLM позволяет работать с неструктурированной информацией.

Проведенные эксперименты показали, что *качество* ответов *зависит от запроса*. Например, если не указать, что из описания необходимо извлекать только явно приведенные данные, то это приводит к ошибке в ответе (Из описания «Алюминиевая наружная дверь левого открывания» будут извлечены такие типы: «Наружная», «Левая», «Распашная» (ошибка)).

Основным недостатком системы является ее *сложность разработки*. Интеграция разнородных технологий (LLM, онтологии и Revit API) потребовала значительных трудозатрат на настройку их взаимодействия. Дальнейшие попытки сделать систему более универсальной, например сделать возможным маркировку всех элементов модели, потребует полного *пересмотра архитектуры* приложения.

Несмотря на приведенные недостатки, предложенный подход может быть расширен на другие задачи строительного проектирования, такие как проверка BIM-моделей на соответствие нормативным

требованиям и технического задания, семантический поиск по нормативной документации или внутренним актам предприятия.

### Литература

1. Волошин А. А., Волошин Е. А., Грачева Н. П. Автоматический синтез оптимальных проектных решений по построению РЗА ЦПС // Релейщик. 2022. № 2 (43). С. 10–13.
2. Лихогруд Н. Г., Лихогруд Г. М., Яловец А. Л. Экспертные системы проектирования объектов строительства // Новости искусственного интеллекта. 1993. № 4. С. 68–91.
3. Шилов Н. Г., Пономарев А. В., Смирнов А. В. Анализ методов онтолого-ориентированного нейро-символического интеллекта при коллаборативной поддержке принятия решений // Informatics and Automation. 2023. № 3(22). С. 576–615.
4. Adedokun T. [и др.]. Hybrid Computational Models: Integrating Symbolic and Subsymbolic Approaches in AI // Researchgate. 2024.
5. Agrawal S. Advancing real-time context-aware retrieval augmented generation (RAG) systems with multi-modal data integration // International journal of computer engineering and technology. 2025. № 1(16). С. 2678–2702.
6. Gu J. A Research of Challenges and Solutions in Retrieval Augmented Generation (RAG) Systems // Highlights in Science, Engineering and Technology. 2025. (124). С. 132–138.
7. Oleynik A. [и др.]. Using RAG technology to design an intelligent information system for support exploratory search // Transaction Kola Science Centre. 2025. № 3(15). С. 5–26.
8. Zhang J., El-Gohary N. M. Semantic NLP-Based Information Extraction from Construction Regulatory Documents for Automated Compliance Checking // Journal of Computing in Civil Engineering. 2016. № 2(30). С. 04015014.

УДК 711.73

*Александр Николаевич Кланюк,*  
студент

(Тюменский индустриальный университет)

*E-mail: klanyuksasha@mail.ru,*

*ORCID: 0009-0005-8296-3955*

*Alexandr Nikolaevich Klanyuk,*  
student

(Industrial University of Tyumen)

*E-mail: klanyuksasha@mail.ru,*

*ORCID: 0009-0005-8296-3955*

## **НЕОБХОДИМОСТЬ РАЗРАБОТКИ ПРОГРАММЫ КОМПЛЕКСНОГО АНАЛИЗА И ОПТИМИЗАЦИИ УЛИЧНО-ДОРОЖНОЙ СЕТИ**

### **THE NEED TO DEVELOP A COMPREHENSIVE ANALYSIS AND OPTIMIZATION PROGRAM FOR THE ROAD NETWORK**

Статья посвящена вопросам анализа всех этапов формирования и развития улично-дорожной сети в процессе урбанизации. Дано определение основных действующих программных комплексов для этих задач. С использованием информационных технологий выдвинуто предложение создать программный продукт. Освещен предмет исследования с делением на существующие группы программ. Описаны общие тенденции развития улично-дорожной сети, а также процессы, которые будут обрабатываться. Изложен принцип работы информационных комплексов в IT-сфере.

*Ключевые слова:* программный продукт, улично-дорожная сеть, транспортная инфраструктура, оптимизация, градостроительство, интенсивность, пропускная способность, плотность.

The article is devoted to the issues of analysis at all stages of the formation and development of the road network in the process of urbanization. The definition of the main operating software packages for these tasks is given. A proposal has been made to create a software product using information technology. The subject of the study is highlighted, divided into existing groups of programs. The general trends in the development of the road network, as well as the processes that will be processed, are described. The principle of operation of information complexes in the IT sphere is described.

*Keywords:* software product, street and road networks, transport infrastructure, optimization, urban planning, intensity, capacity, density.

В России более 1100 городов, включающих в себя городское и сельское население, из них 16 городов-миллионники и 20 горо-

дов с населением от полумиллиона до миллиона жителей. Такие города в своем большинстве растут не за счет превосходящего числа рождаемости над смертностью, вследствие процессов урбанизации, когда более крупный город привлекает своей более развитой культурой образа жизни и концентрирует в себе большую часть собранных достижений цивилизации. Приток населения требует строительства новых градообразующих объектов начиная с мест проживания и заканчивая заводами и фабриками для поддержания сложившегося уровня жизни. Одновременно с этим и развивается улично-дорожная сеть, которая представляет собой комплекс взаимосвязанных дорог и многофункциональных объектов, находящихся в пределах городской агломерации.

Однако не всегда представляется возможным достоверно определить качество развития такой сложной структуры и дать ей оценку [1]. Связано это с тем, что результат такого процесса может быть как положительным, так и отрицательным. Если в первом случае, результатом является наиболее благоприятная картина улично-дорожной сети с полноценно развитой транспортной инфраструктурой, то во втором случае наблюдаются дорожно-транспортные коллапсы. Они могут проявляться как в виде автомобильных заторов, так и тупиками с несовершенной организацией дорожного движения.

Мониторинг такого положительного или отрицательного эффекта проводится органами местного самоуправления, после чего результаты учитываются [2]. Стремятся повторять положительный опыт, и не допускать отрицательный. В последнем случае, когда результат был получен негативный, то ставится задача перед планировщиками и проектировщиками по ее устранению [3]. Опыт многих городов показывает, что на этот процесс уходит от 3 до 25 лет. Связано это в большей степени именно с процессами мониторинга, которые в последние годы проводятся при помощи компьютерных технологий, а именно датчиков и программных комплексов. Последние играют не только роль мониторинга, но и что самое главное: дальнейшей совокупности алгоритмов по оптимизации и совершенствованию улично-дорожной сети [4].

В области дорожно-транспортной инфраструктуры существуют две группы программных комплексов: дорожные и транспортно-

имитационные. Первая группа решает ряд таких задач как: работа с генеральными и топографическими планами, проектирование автомобильных дорог, организация дорожного движения, расчет дорожных одежд. Для работы с транспортными заторами необходимо оценить вторую группу, которая рассматривает преимущественно транспортные потоки. Данная группа изучает единичные элементы и их совокупность в улично-дорожной сети. Ярким примером таких программ, используемых в России, является разработчик «SIMETRA GROUP», поставляющий такие продукты как PTV Visum и PTV Vissim. Последний предназначен для микроскопического моделирования, что является микросимуляцией где каждый объект моделируется по отдельности.

Visum – это полная противоположность микросимуляции, которая создает транспортные потоки всей улично-дорожной сети на основе статистических данных транспортной плотности, а предлагаемый набор возможного прогнозирования учитывает планирование и проектирование новых линейных объектов и то, как изменятся транспортные потоки. Однако есть особенность программы, лежащая в ее методике анализа для существующей транспортной инфраструктуры. Заключается она в том, что плотность потоков с загруженностью определяются локально, т.е. их изучение – дискретное и будет привязано только к тем точкам, в которых эти замеры проводились. Несмотря на сложность алгоритмов, которые вручную не представляется возможным просчитать, методика является одновременно и работоспособной, и интуитивно понятной. Имея данные, например, по интенсивности и пропускной способности, можно определить уровень загрузки, которые в программе дифференцируются на бесконечное количество малых участков в зависимости от мест притяжений, съездов, проездов, возможности параллельных парковок, разворотов, остановок и так далее. Эта дифференциация, а при обратной задаче и интегрирование, являются существенным плюсом данной программы по заранее известной методике.

Однако существуют такие зависимости, когда взаимодействие одних элементов не просто влияет на другие, но и изменяет их показатели [5, 6]. Представим ситуацию на примере небольшого микрорайона в час-пик с 7:30 до 8:30 и с 17:00 до 18:30. Так, на рис. 1 видно,

какие участки наиболее загружены, однако данный коэффициент определяется отношением дискретных и статически неизменяемых параметров, а именно интенсивности к пропускной способности. Существующие программные комплексы имитируют транспортные потоки опираясь на такой важный показатель как плотность [7], в результате отдельные линейные участки определяются как загруженные из-за мест притяжений, таких как торговые центры, школы, больницы, заводы и прочее [8, 9]. Несмотря на то, что изучаемые объекты являются линейными, их отображение загруженности можно представить в виде площадного графика или изохромы, в случае сглаживания углов для появления кривых.

Авторами развивается методология, когда значения пропускной способности изменяются в зависимости друг от друга, в результате чего уровень загруженности будет коррелироваться по этому значению. На рис. 2 представлены значения, измененные с учетом пропускной способности. При анализе существующих методик была выделена группа графических с различными способами отображения данных: линейными, графическими и сетевыми. Важно отметить, что линейные являются дискретными методиками, а площадные и сетевые – комплексными.

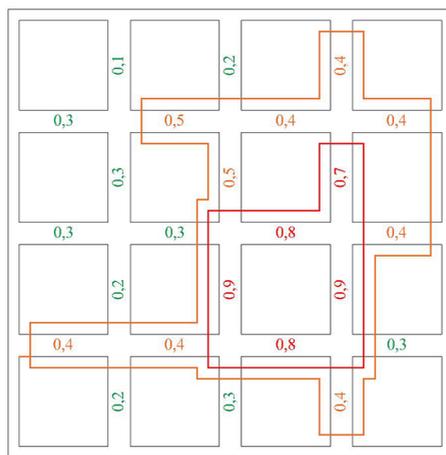


Рис. 1. Принцип работы существующих программных комплексов

Особенность разрабатываемой методологии заключается в том, что транспортно-эксплуатационные параметры уходят на второй план, уступая место транспортно-техническим характеристикам, т. е. плотность автомобильных средств становится менее значимой по сравнению с максимальными возможностями улично-дорожной сети. Фактически отображение становится не площадным, а сетевым, что позволяет проводить анализ улично-дорожной сети не только на уровне градостроительства, но и в дорожно-эксплуатационной деятельности.

На сегодняшний день существует большое количество программных комплексов, позволяющих дать оценку работоспособности улично-дорожной сети. Помимо них в помощь идут и карты различных онлайн сервисов, работающие на основе времени задержки и длины очереди. Задачи, которые выполняют приведенные сервисы и программы, разнообразны, и зависят в первую очередь от ожидаемого результата.

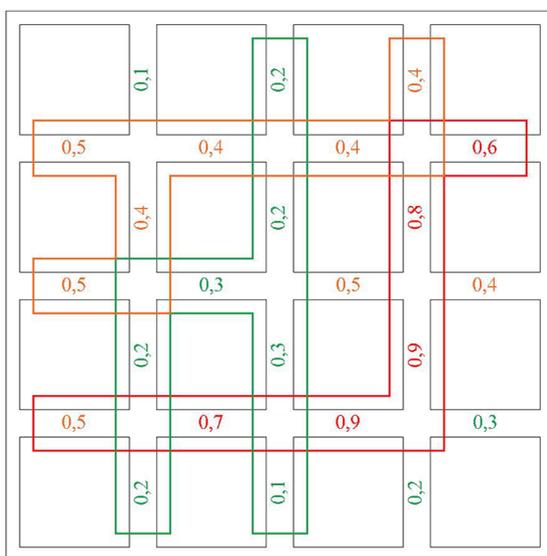


Рис. 2. Принцип работы будущей программы на основе разрабатываемой методологии

При написании программы на основе разрабатываемой методологии, авторами, в будущем планируется привлечение специалистов IT-сферы. Результатом работы данного продукта будет являться выявление неоптимальных точек в улично-дорожной сети, а также, в качестве дополнительного эффекта, пути решения на основе уже существующих методов с заданными алгоритмами.

### Литература

1. *Маремуха А. В.* Теоретические аспекты интеллектуальных транспортных систем // *Фундаментальные и прикладные исследования молодых ученых : сборник материалов VII Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, приуроченной к 110-летию со дня рождения Т. В. Алексеевой*, Омск, 20–21 апреля 2023 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). 2023. – С. 196–198. EDN: XEQTXX

2. *Тимоховец В. Д., Чичианова Я. И.* Обоснование необходимости совершенствования транспортной сети в городе Тюмени // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2021. Т. 23, № 1. С. 150–160. DOI 10.31675/1607-1859-2021-23-1-150-160. EDN: PUUIUH.

3. *Тимоховец В. Д., Чичианова Я. И.* Современные транспортные проблемы на улично-дорожной сети городов и подход к их решению // *Транспортные и транспортно-технологические системы: Материалы Международной научно-технической конференции*, Тюмень, 15 апреля 2021 года / Отв. редактор Н. С. Захаров. – Тюмень : Тюменский индустриальный университет, 2021. С. 262–266. EDN: EIFYDD.

4. *Параскевов А. В., Желиба В. К.* Оптимизация загруженности уличной дорожной сети // *Научный журнал КубГАУ – Scientific Journal of KubSAU*. 2015. № 110. С. 1–13. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/optimizatsiya-zagruzhennosti-ulichnoy-dorozhnoy-seti/>

5. *Тимоховец В. Д., Кланюк А. Н.* Особенности подходов анализа состояния улично-дорожной сети // *Развитие теории и практики транспортного строительства, информационной поддержки транспортных систем: сборник статей Всероссийской научно-практической конференции*, Санкт-Петербург, Петергоф, 21 июня 2024 года. – Санкт-Петербург, Петергоф : Военный институт (железнодорожных войск и военных сообщений), 2024. С. 169–173. EDN: CTZSEL.

6. *Санников С. П., Тимоховец В. Д., Кланюк А. Н.* Влияние исторических особенностей развития города на современную транспортную систему на примере г. Тюмени // *Транспорт Российской Федерации*. 2024. № 2(111). С. 59–61. EDN: YGFXVT.

7. *Важенина Е. В., Храмов А. Б.* Проблемы развития дорожно-транспортной сети муниципального образования (на примере г. Тюмени) // Муниципальная экономика. 2015. № 4(64). С. 52–60. URL: <http://emsu.ru/extra/pdf5s/me/2015/4/52.pdf> EDN: UNDDHN.

8. *Ульянов В. И.* Перспективные пути решения проблем транспортной загрузки в крупнейших городах России // Инновации и инвестиции. 2020. № 8. С. 215–220. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/perspektivnye-puti-resheniya-problem-transportnoy-zagruzki-v-krupneyshih-gorodah-rossii/>

9. *Алешева А. Д.* Транспортные заторы как вынужденная несвобода: проблема рационального использования времени // Ноэма. 2020. № 1(4). С. 147–151. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/transportnye-zatory-kak-vynuzhdennaya-nesvoboda-problema-ratsionalnogo-ispolzovaniya-vremeni> EDN: ATPHRN/

УДК 624.327

Станислав Валерьевич Пиндур,  
аспирант  
(Сибирский федеральный университет)  
E-mail: pindur@inbox.ru

Stanislav Valerievich Pindur,  
postgraduate student  
(Siberian Federal University)  
E-mail: pindur@inbox.ru

## КОМПЛЕКСНЫЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ 3D-ПЕЧАТИ

### COMPREHENSIVE METHOD OF CONTROL OF CONSTRUCTION PARAMETERS 3D PRINTING

В статье рассмотрен гибридный метод контроля параметров 3D-печати строительных изделий. Приведены результаты имитационного исследования процесса подачи строительной смеси от накопительного бункера к печатающей головке принтера в среде Matlab\*Simulink, результаты экспериментальных исследований нейросетевого управления процессом контроля параметров формируемого изделия с применением компьютерного зрения. Для создания высокоэффективной САУ шаговыми двигателями 3D-принтера предложено применить технологии искусственного интеллекта.

*Ключевые слова:* строительный 3D-принтер, бетонная смесь, характер колебаний, автоматизированный контроль, параметры.

The article discusses a hybrid method for controlling the parameters of 3D printing of construction products. The results of a simulation study of the process of feeding the construction mixture from the storage hopper to the printer's printhead in the Matlab\*Simulink environment, the results of experimental studies of non-network control of the process of controlling the parameters of the formed product using computer vision are presented. It is proposed to use artificial intelligence technologies to create a highly efficient ACS with stepper motors of a 3D printer.

*Keywords:* construction 3D printer, concrete mix, vibration pattern, automated control, parameters.

В настоящее время в строительстве применяются технологии трехмерной печати строительных объектов и их элементов. Бетонная смесь в процессе печати подается из печатающей головки по бетонпроводу круглого сечения. Это создает ребристость формируемой поверхности, что требует последующей операции отделочных работ. Также нельзя не отметить, что в этом методе строительства затруднен принцип армирования, в связи с чем созданные здания с помощью тех-

нологий 3D-печати могут быть, в основном, малоэтажными. Стены, перегородки и весь конструктив объекта имеет самонесущую функцию, ограничивая возможности постройки более масштабных проектов [1]. При печати возникают различные дефекты в виде нарушения геометрии формы, слоистости, дислокаций. Существующие методы контроля качества трехмерной печати не обеспечивают решения возникающих недостатков. Также отсутствует комплексный подход при решении поставленной задачи [2].

Широкое развитие информационных технологий позволяет вести контроль 3D-печати строительных изделий в режиме реального времени, вести сбор данных о состоянии строительной смеси, хранение и передачу информации в режиме реального времени. На данный момент вопрос разработки комплексного подхода к контролю 3D-печати строительных изделий требует дополнительной проработки. Кроме того, на данный момент существует потребность дооснащения отечественных моделей 3D-принтеров системами непрерывного контроля качества печати строительных изделий, что обуславливается общемировыми тенденциями развития рыночной экономики, а также тенденциями развития цифровизации и импортозамещения [3–4].

Анализ исследований в рассматриваемой области показал, что информации о существующих системах непрерывного неразрушающего контроля строительных изделий в процессе 3D-печати недостаточно. Для решения задачи необходимо исследовать физические процессы, протекающие в смеси в ходе подачи строительной смеси из бункера в печатающую головку 3D-принтера, характер взаимодействия 3D-принтера со смесью, точности позиционирования элементов 3D-принтера и влияния приводных механизмов оборудования на точность позиционирования печатающей головки принтера. Для этих целей широко применяются программно-аппаратные системы, имитационные и информационные технологии.

### **Материалы и методы**

Для реализации интеллектуальных систем контроля параметров трехмерной печати строительных изделий, использованы имитационные модели, позволяющие детально исследовать физические процессы, получить теоретические данные и выявить значимые за-

висимости изменений различных параметров; виброакустическое диагностирование 3D – принтера; нейросетевое управление с применением компьютерного зрения, выполняемого при рабочих режимах в процессе производства работ в режиме Online.

Экспериментальные исследования проводились на экспериментальном образце 3D-принтера портального типа с применением цифровых технологий на платформе Arduino. Использовались датчики вибрации DFR0052 пьезоэлектрические, датчик тока ACS712, ПИД регулятор (DAMP/ GAIN) с драйвером щеточного серводвигателя ЩСД PLD2080s. Измерения проводились с работой установки на холостом ходу, а также в режиме печати.

### Результаты

Имитационное моделирование выполнялось в среде Matlab\*Simulink. Для процесса наполнения бункера бетонной смесью по уравнению регрессии построена функция амплитуды зависимости наполнения уровня принимающего бункера (м) от скорости подачи бетона в бункер (л/ч), при различных значениях диаметра бункера (см), (рис. 1).

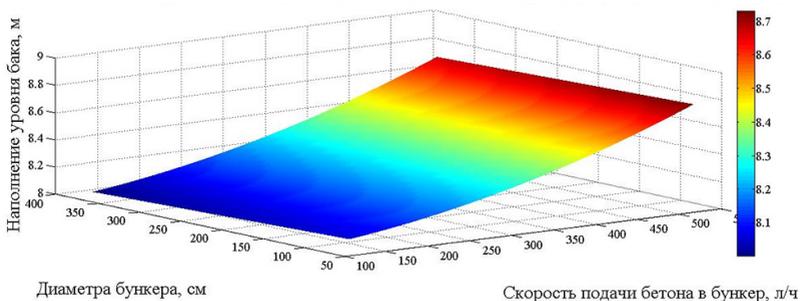


Рис. 1. Зависимость наполнения уровня бака (м) от скорости подачи бетона в бункер (л/ч) и диаметра бункера (см)

Виброакустическое диагностирование процесса печати выполнено для перемещения рабочей платформы. На рис. 2 показаны графики изменения амплитуды колебаний относительно осей координат  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ .

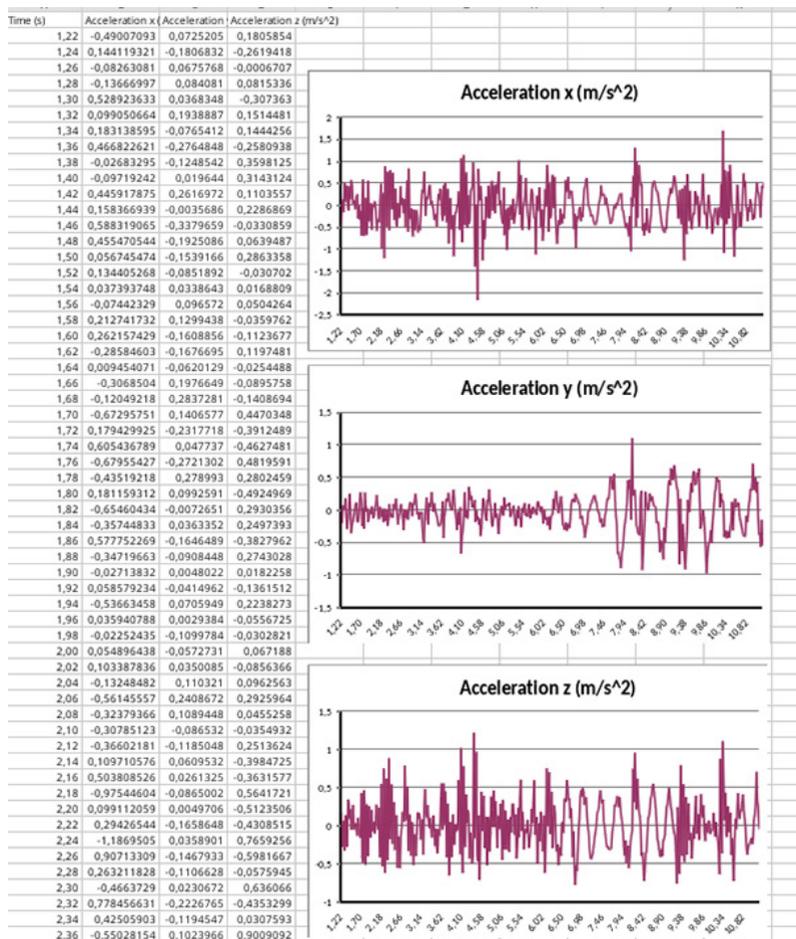


Рис. 2. Виброграммы колебательного процесса формования строительного изделия

По полученным осциллограммам делаем вывод, что характер колебаний синусоидальный, сложного вида. Амплитуда колебаний достигла 1,5 мм. Это не вызывает деформаций и разрушения строительного принтера, что положительно скажется на его долговечности.

Разработана система управления шаговыми двигателями 3D-принтера на основе нейро-нечеткой (НН) системы вывода (Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System – ANFIS), обладающей достоинствами искусственных нейронных сетей способных обучаться, и нечеткого вывода, позволяющего учесть экспертные знания (рис. 3).

Выполнено численное моделирование работы непрерывной САУ в программной среде MATLAB/Simulink. Получен набор данных переменных, который разделен на обучающую и тестовую выборку в пропорции 70 % и 30 % соответственно.

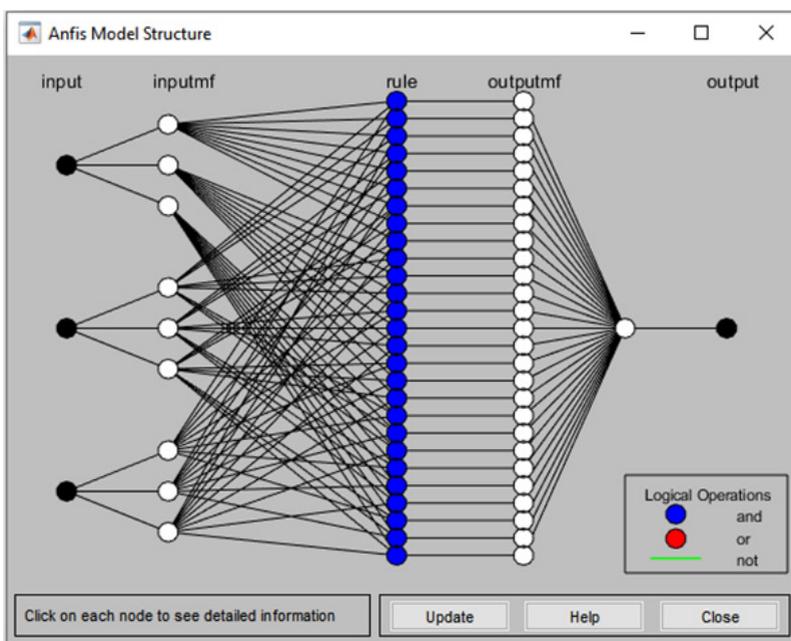


Рис. 3. Структура нейро-нечеткой системы управления

Результаты обучения нейро-нечеткой продукционной сети приведены в табл. 1. Точность при использовании треугольных функций принадлежности равна  $2,636 \times 10^{-5}$ , гауссовых ФП –  $2,635 \times 10^{-5}$ . Очень близкие результаты расчета показателя RMSE.

Таблица 1

## Результаты обучения нейро-нечеткой системы

Количество ФП входных переменных (три переменные)			Тип ФП входа	Тип ФП выхода	RMSE
<i>E</i>	<i>IE</i>	<i>DE</i>			
3	3	3	Треугольная	Линейная	$2,636 \times 10^{-5}$
3	3	3	Гауссова	Линейная	$2,635 \times 10^{-5}$

Метод структурированного света включает проекцию заранее известного шаблона на объект. Камера фиксирует искажения этого шаблона на поверхности объекта. Анализ деформаций позволяет вычислить координаты каждой точки объекта.

Для каждой точки  $P(x, y, z)$  объекта, глубина  $z$  рассчитывается, анализируя искажения шаблона с учетом угла проекции и расстояния до камеры:

$$Z = \frac{B \cdot d}{\Delta x}$$

где  $B$  – расстояние между проектором и камерой;  $d$  – расстояние между соседними полосами на шаблоне;  $\Delta x$  – сдвиг полосы, зафиксированный камерой.

Наличие дефектов (то есть темных участков) поверхности печатаемого элемента, будут видны яркие фрагменты зеленого цвета (рис. 4). По яркости и равномерности свечения данных фрагментов можно судить о наличии дефектов или их отсутствии. При отсутствии дефектов на поверхности (плоскости) печатаемого элемента, область будет подсвечена равномерным зеленым цветом.

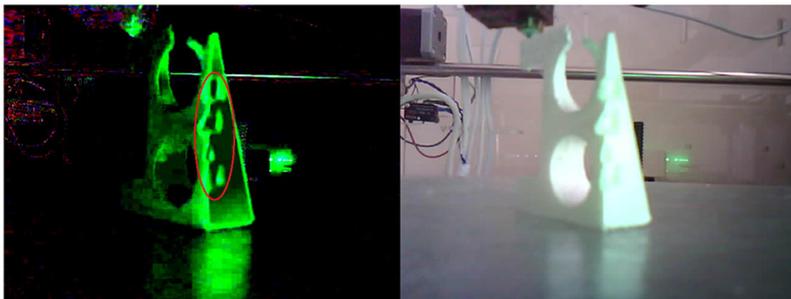


Рис. 4. Наличие дефектов на одной из плоскостей печатаемого элемента (слева – обработанное изображение, справа – исходное)

### Выводы

В результате проведенных исследований были установлены закономерности изменения параметров 3D-печати строительных изделий при различных режимах работы 3D-принтера. Применение комплексного метода контроля, базирующегося на проведении имитационных исследований, нейросетевого управления процессом печати с использованием компьютерного зрения, позволяет вести контроль параметров 3D-печати в реальном времени, а также хранение и передачу полученной информации. В ходе проведения испытаний был изучен механизм влияния состава строительной смеси на расплывчатость формируемого изделия и скорость твердения.

### Литература

1. ГОСТ 26433.1-89 «Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве». М. : Стандартинформ. 1990. – 3 с.
2. Лунева Д. А., Кожевникова Е. О., Калошина С. В. Применение 3D-печати в строительстве и перспективы ее развития // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2017. – Т. 8, № 1. – С. 90–101. DOI: 10.15593/2224-9826/2017.1.08.
3. Андреев Н. Ю., Прокопьев А. П. Моделирование динамики строительных манипуляторов // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. 2019. Т. 8. – СПб. : Изд-во Политехн. ун-та, 2019. – С. 132–135.
4. Аржанников А. О., Тимошенко Д. О., Игнатьев Г. В. Совершенствование 3D-принтера для производства строительных конструкций // Материалы II Всероссийской межвузовской конференции: в 2 частях. 2017.

## **Секция «Строительная физика, электроэнергетика и электротехника»**

**УДК 628.9**

*Александр Евгеньевич Епишкин,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*Алексей Александрович Костроминов,*  
канд. техн. наук, доцент,  
руководитель компании  
«Центр технических курсов АКС»  
*E-mail: epishkin@mail.ru,*  
*kostrominov@aks-ecc.ru*

*Aleksandr Evgenievich Epishkin,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*Alexey Alexandrovich Kostrominov,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor,  
Head of the company  
«Center for technical courses AKS»  
*E-mail: epishkin@mail.ru,*  
*kostrominov@aks-ecc.ru*

### **АНАЛИЗ ПОЛЬЗОВАТЕЛЬСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАМП ОСВЕЩЕНИЯ**

#### **USER CHARACTERISTICS ANALYSIS LIGHTING LAMPS**

В статье рассмотрены некоторые характеристики применяемых в настоящее время различных электрических ламп систем освещения, оказывающих влияние как на здоровье человека, их использующего, так и на их питающую электрическую сеть. Рассмотрены спектры излучений ламп и их искажения естественного солнечного спектра. Дано влияние нелинейности нагрузки электрических ламп на напряжение их питания. Дана характеристика сроков службы энергосберегающих ламп.

*Ключевые слова:* освещение, светильники, лампы, спектр освещения, нелинейная нагрузка, продолжительность работы.

The article discusses some of the characteristics of various electric lamps currently used in lighting systems that affect both the health of the person using them and their supply network. The emission spectra of lamps and their distortion of the natural solar spectrum are considered. The influence of the nonlinearity of the load of electric lamps on their supply voltage is given. The characteristic of the service life of energy-saving lamps is given.

*Keywords:* lighting, fixtures, lamps, lighting spectrum, nonlinear load, duration of operation.

Лампа накаливания является лидером среди всех типов ламп по длительности жизненного цикла. В быту они массово использовались вплоть до 2005 года. Итого жизненный цикл их глобально-массового использования составил 83 года. Но технический прогресс не стоит на месте и на смену лампам накаливания после 2005 года пришли энергосберегающие лампы на основе газоразрядных источников света. После 2010 года их постепенно начали вытеснять светодиодные лампы, которые к 2016 году практически полностью захватили нишу осветительных приборов и вытеснили другие виды ламп.

Энергосберегающие люминесцентные лампы были на пике популярности около 10 лет, а светодиодные, достигнув такого же срока жизни, пока не собираются уходить со сцены.

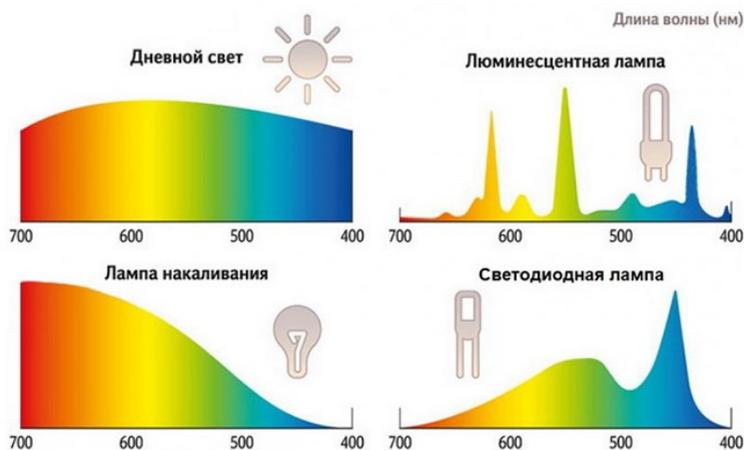


Рис. 1. Спектры излучений, по данным МФТИ

В спектре светодиодной лампы нетрудно заметить ярко выраженный максимум излучения в синем диапазоне (рис. 1). Причем значительная его часть находится в области так называемого вредного синего света (от 380 до 450 нм). Ширина этого максимума больше чем в энергосберегающих, то есть и энергия излучения в синем диапазоне выше. Отсюда вывод, что и вредное воздействие сильнее. Да, есть

светодиодные лампы разных температурных цветов, у ламп с теплым светом синий максимум невелик, но все же значительно выше, чем у ламп накаливания. В быту чаще всего используют лампы с нейтральным белым светом, спектр которого мы и рассматриваем. А в лампах с холодным светом синий максимум просто достаточно большой и не рекомендуется их использовать в домашних условиях [1, 2].

Люминофор низкокачественных светодиодов, да еще и в предельном режиме их работы пропускает некоторую часть ультрафиолетового излучения, вредного для зрения человека.

Влияние энергосберегающих лампочек на напряжение в сети. Данные лампы являются нагрузкой с нелинейными характеристиками. Нелинейными нагрузками в настоящее время, как правило, являются блоки питания, содержащие полупроводниковые элементы: диоды, транзисторы и т. д. Нелинейные нагрузки, в целом, плохо влияют на напряжение в питающей сети (рис. 2). На рис. 2, б видно, что форма тока далека от синусоидальной и искажена большим количеством импульсных помех.

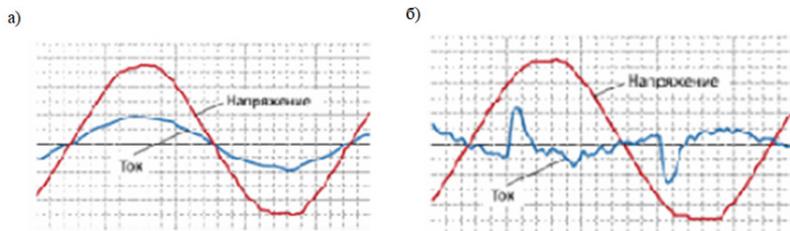


Рис. 2. Напряжения и токи ламп:  
а – накаливания; б – энергосберегающей лампы

Примерами других бытовых нелинейных нагрузок являются оргтехника: компьютеры, копировальные аппараты; бытовые приборы: телевизоры, микроволновые печи, стиральные машины, индукционные плиты, источники бесперебойного питания.

К нелинейным нагрузкам, оказывающим наибольшее влияние на сеть, являются промышленные нагрузки: электрические приводы двигателей, сварочные автоматы. Как правило, небольшое количество маломощных нелинейных нагрузок оказывают малое влияние на пи-

тающую сеть, то есть генерируют малое количество высокочастотных помех. Но в современном мире их количество растет, и в будущем они могут представлять уже проблему для электрических сетей.

В западных странах согласно законодательству, энергосберегающие лампы продаются только с фильтрами, не пропускающими высокочастотные помехи, генерируемые лампами, в питающую сеть. Поскольку сеть является общей и для других нагрузок, таким образом, защищаем других энергопотребителей и оборудование от помех, которые могут влиять на их работу. Фильтры устанавливаются в цоколь лампы вместе с управляющей электроникой, и являющейся источником помех. В России эти лампы продаются без фильтров, потому что нет аналогичного закона. К тому же лампы с фильтрами стоят дороже ламп без фильтров, поэтому продавать их в нашей стране без информирования населения попросту бессмысленно. А в странах, где есть соответствующий закон, вопрос какие лампы покупать, с фильтром или без, попросту не стоит.

Отдельное внимание нужно уделить диммированию света, то есть регулирования яркости освещения. В классических лампах это осуществлялось с помощью потенциометра. Современные диммеры это реализуют с помощью широтно-импульсного преобразователя. В результате светодиодная лампа включается и выключается с большой частотой, незаметной глазу человек, который работает как фильтр. Но пульсации свечения все равно улавливаются организмом и оказывают на него свое влияние, что вызывает повышенную утомляемость.

Еще одной привлекающей покупателей характеристикой, является продолжительность работы. Ряд поставщиков светодиодных ламп завышают эту характеристику и заявляют ресурс 25–50 тысяч часов, что составляет несколько лет. К этой информации нужно относиться осторожно. Отдельный светодиод может гореть десятки тысяч часов в благоприятных для себя условиях: малое количество включений/выключений, температура окружающей среды 20–40 градусов.

В энергосберегающих лампах рядом могут работать с десятком светодиодов, подогревающих друг друга. Кроме того, как правило, плохо организована система охлаждения внутри энергосберегающих ламп. Поэтому служба энергосберегающих ламп, как правило, чаще всего заканчивается перегоранием одного светодиода.

Большой срок службы практически не реален, прежде всего, потому, что это невыгодно производителям любых, и не только светодиодных лампочек. Так было всегда, и если лампочка проработает одну – две тысячи часов, это будет хорошо.

Исходя из изложенного, можно сделать вывод, что у ламп накаливания самый качественный и безопасный для зрения свет. Но при этом, они по всем остальным характеристикам кратно уступают светодиодным лампам. И, несмотря на все эти недостатки, ламп накаливания, их крайне низкий КПД, низкий ресурс, отказываться от них на сегодняшний день еще рано.

Если пользоваться светодиодными лампами, то не нужно на них экономить. Лечение зрения обойдется гораздо дороже. Или использовать там, где люди проводят малое время.

#### **Литература**

1. ГОСТ Р МЭК 62471–2013. Лампы и ламповые системы. Светобиологическая безопасность.
2. Почему я выбросил все светодиодные лампы и перешел на обычные лампы накаливания URL: [https://overclockers.ru/blog/remont\\_accumulyatora\\_noutbuka/show/176113/Pochemu-ya-vybrosil-vse-svetodiodnye-lampy-i-pereshel-na-obychnye-lampy-nakalivaniya](https://overclockers.ru/blog/remont_accumulyatora_noutbuka/show/176113/Pochemu-ya-vybrosil-vse-svetodiodnye-lampy-i-pereshel-na-obychnye-lampy-nakalivaniya) (дата обращения: 01.02.2025).

**УДК 621.311.6**

*Дмитрий Александрович Плуток,*

студент

*Сергей Андреевич Сергеев,*

студент

*Анна Руслановна Яруллина,*

студент

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

*E-mail: 21000660@edu.spbgasu.ru,*

*21000656@edu.spbgasu.ru,*

*21000661@edu.spbgasu.ru*

*Dmitry Alexandrovich Plutok,*

student

*Sergey Andreevich Sergeev,*

student

*Anna Ruslanovna Yarullina,*

student

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

*E-mail 21000660@edu.spbgasu.ru,*

*21000656@edu.spbgasu.ru,*

*21000661@edu.spbgasu.ru*

## **АНАЛИЗ И СРАВНЕНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО ВВОДА РЕЗЕРВА НА ОСНОВЕ РЕЛЕ И НА ОСНОВЕ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО УПРАВЛЕНИЯ**

### **ANALYSIS AND COMPARISON OF RELAY AND MICROPROCESSOR AUTOMATIC RESERVE INPUT**

Произведен комплексный анализ современных систем автоматического включения резерва (АВР), с акцентом на их важность для обеспечения надежности электроснабжения, особенно на критически важных объектах. Рассмотрены требования к АВР, преимущества и недостатки различных типов контроллеров, а также отмечены перспективы дальнейших исследований, включая разработку более умных систем с использованием сложных алгоритмов, например, адаптивных. Работа показывает, что системы на основе микроконтроллеров обладают рядом преимуществ перед традиционными реле.

*Ключевые слова:* автоматический ввод резерва, АВР, контроллеры, контроллеры с программируемой логикой, контроллеры на микропроцессорах, реле, контакторы, автоматические выключатели, время переключения, твердотельные аппараты.

A comprehensive analysis of modern automatic power reserve switching (APS) systems is carried out, with an emphasis on their importance for ensuring the reliability of power supply, especially at critical facilities. The requirements for APS, the advantages and disadvantages of various types of controllers are considered, and prospects for further research are noted, including the development of smarter systems using complex algorithms, such as adaptive ones. The work shows that microcontroller-based systems have a number of advantages over traditional relays.

*Keywords:* automatic reserve input, AVR, controllers, controllers with programmable logic, controllers on microprocessors, relays, contactors, automatic switches, switching time, solid-state devices.

## **Введение**

В современных условиях развития промышленности и технологий вопросы бесперебойного электроснабжения приобретают особую актуальность. Растущая зависимость производственных процессов, систем жизнеобеспечения и информационных технологий от качества и непрерывности электропитания требует внедрения надежных решений для обеспечения резервного питания.

Традиционное ручное управление источниками резервного питания уже не отвечает современным требованиям эффективности и безопасности. Возникает необходимость в автоматизации процессов переключения на резервные источники электроснабжения, что особенно важно для объектов с повышенными требованиями к надежности энергоснабжения [1].

Устройства автоматического включения резерва (АВР) представляют собой современное техническое решение, позволяющее обеспечить мгновенный или с минимальной задержкой переход на резервное питание при возникновении сбоев в основной сети. Их применение становится необходимым для поддержания непрерывности технологических процессов и предотвращения аварийных ситуаций.

Актуальность исследования вопросов установки автоматического ввода резерва обусловлена растущей потребностью в повышении надежности электроснабжения критически важных объектов, снижением времени простоя оборудования и минимизацией рисков, связанных с перебоями в подаче электроэнергии [2]. Внедрение АВР позволяет не только обеспечить бесперебойную работу электрооборудования, но и существенно повысить безопасность эксплуатации электрических систем в целом.

В связи с этим представляется целесообразным провести комплексный анализ существующих решений в области автоматического ввода резерва, их технических характеристик и возможностей практического применения для различных объектов электроснабжения.

### **Требования к современному АВР**

АВР предназначен для переключения при пропаже напряжения или иных неполадках в питающей сети с ввода один без вмешательства человека, то есть автоматически, на ввод два – резервный с минимальным временем переключения для обеспечения в электроснабжении высокой степени надежности [3].

К системам автоматического ввода резерва (АВР) предъявляются следующие ключевые требования:

- 1) готовность к немедленному действию:
  - постоянная готовность к срабатыванию;
  - обеспечение включения при любом прекращении питания;
  - наличие нормального напряжения на резервном источнике;
- 2) защитные функции:
  - предотвращение включения резервного источника на короткое замыкание;
  - контроль отключенного состояния выключателя рабочего источника;
  - однократность действия для исключения многократного включения на КЗ;
  - ускорение защиты после срабатывания АВР;
- 3) временные характеристики:
  - минимальное время срабатывания;
  - обеспечение успешного самозапуска электродвигателей;
  - быстрота восстановления нормального режима;
- 4) контроль параметров:
  - запрет включения при пониженном напряжении на резервном источнике;
  - мониторинг качества электроснабжения;
  - контроль допустимых режимов работы;
- 5) синхронизация и совместимость:
  - исключение несинхронных включений синхронных двигателей;
  - предотвращение перегрузки оборудования;
  - обеспечение совместимости с существующей сетью;
- 6) функциональные возможности:
  - возможность автоматического восстановления доаварийного режима;

- согласование работы с устройствами релейной защиты;
  - обеспечение селективности действия;
- 7) специальные требования:
- работоспособность в различных режимах сети;
  - устойчивость к электромагнитным помехам;
  - надежность функционирования в широком диапазоне условий эксплуатации.

### **Классификация АВР по типу реализации**

В первую очередь АВР состоит из двух основных частей: орган управления и механическая часть. Под механической частью понимаются коммутационные устройства, благодаря которым происходит непосредственное размыкание или замыкание электрических сетей – это либо электромеханические автоматические выключатели и контакторы, либо твердотельные коммутационные аппараты. Орган управления выполняет такие функции, как измерение характеристик сети, сбор информации, ее анализ и управление механической частью. К органу управления относят электрические и электронные аппараты, а именно электромагнитные реле, твердотельные реле, контроллеры с программируемой логикой и контроллеры на микропроцессорах.

По типу реализации АВР делят на электромеханические (механические) и электронные [4].

Где электромеханические АВР являются наиболее простыми и дешевыми, они состоят из электромагнитных реле, которые выступают органом управления, и контакторов или автоматических выключателей, которые являются механической частью. Такая система обеспечивает время переключения до 1 секунды, и ее рекомендуется устанавливать в сети с допустимыми кратковременными перебоями.

Электронные АВР отличаются от механических АВР элементами, из которых состоит органа управления, а именно в его основе задействованы твердотельные реле, программируемые контроллеры или контроллеры на микропроцессорах. Механическая же часть остается такой же, как и у электромеханических АВР, только тут используют еще твердотельные коммутационные аппараты. Этот тип АВР является быстродействующим и позволяет достигать время переключения менее 10 миллисекунд, также обеспечивает высокую точность

срабатывания. Цена электронных АВР намного выше, чем электро-механических АВР, в связи с использованием в структуре электронных АВР элементов электроники и микроэлектроники.

### Электро-механические (механические) АВР

Разберем более подробно автоматический ввод резерва электро-механического типа. Такой тип АВР является самым простым из всех АВР. Самая простая схема электро-механического АВР для трех-фазной цепи строится на одном реле для контроля фаз на основном вводе, и двух контакторов или автоматических выключателях для переключения на резервный ввод. Принципиальна эта схема работает так: реле измеряет значение тока на основном вводе, при его пропаже реле подает сигнал на контакторы, чтобы один контактор, установленный на основном вводе, разомкнулся, а второй, установленный на резервном вводе, замкнулся. Тем самым обеспечивается резервирование сети. Но чаще всего на практике применяют схему, состоящую из двух или более реле для отслеживания большего количества характеристик, таких как сдвиг фаз, контроль фаз на резервном источнике и так далее, и двух контакторов для коммутации сети. Конечно, увеличение количества реле приводит к увеличению стоимости самого АВР, но также и повышает его надежность.



Рис. 1. Электро-механическое АВР на двух реле и двух контакторах

Разобрав принцип работы электромеханического АВР, можно рассмотреть его положительные и отрицательные стороны. Одним из больших плюсов такого типа АВР является его простота, то есть его схема исполнения, она состоит из двух реле и двух контакторов. Отсюда вытекает еще один его плюс – это низкая цена, стоимость одного трехфазного реле контроля фаз составляет около трех тысяч рублей (3000 рублей) [5], а одного электромеханического контактора – до двух тысяч рублей (2000 рублей) [5], цены на март 2025 года. Таким образом возможно осуществить резервирование за десять тысяч рублей (10 000 рублей). У электромеханических АВР высокая ремонтпригодность потому, что схема исполнения достаточно проста, а следовательно, легко произвести техническое обслуживание, что является плюсом. В связи со своей принципиальной конструкцией реле и контакторы слабо восприимчивы к таким внешним факторам, как электромагнитная обстановка или механическое воздействие, это является положительной стороной таких АВР. Перечислив несколько фактов выше, можно сделать вывод о том, что электромеханические АВР имеют большую надежность работы, что является одним из главных плюсов данной системы. И у такого типа АВР есть механическая и электрическая защита от одновременного включения основного и резервного источника питания.

Но также, как и у всего, у электромеханических АВР есть и свои отрицательные стороны, например, звуки при работе контакторов на втягивание и отпусkanie сердечника (якоря), то есть шумовое загрязнение. Следствием подвижной части в конструкции контакторов является их механический износ, что приводит к ограниченному количеству срабатываний, а именно около одного миллиона раз. Также на их механический износ влияет образование электрической дуги, которая может образовываться при замыкании или размыкании цепи на контактах, и под действием которой может произойти приваривание подвижной и неподвижной частей контактора. Но наиболее значимым минусом является относительно большое время переключения с основного ввода на резервный ввод по сравнению с электронными АВР, до 1 секунды.

## Тиристорные АВР

Перейдем к рассмотрению автоматического ввода резерва, основанного на тиристорах или IGBT-транзисторах, еще называют тиристорные АВР или твердотельные АВР, такие АВР основаны на законах и эффектах электроники и микроэлектроники. Благодаря этому их габариты не велики по сравнению с электромеханическими АВР, что является их плюсом. Также время переключения тиристорных АВР составляет менее 10 миллисекунд, что намного меньше по сравнению с другими типами АВР, поскольку у твердотельных аппаратов нет подвижных частей, как у электромеханических контакторов. Отсюда можно выделить еще один положительный момент о том, что у тиристорных АВР нет проблем, которые имеются у электромеханических АВР с механической частью у контакторов, как, например, механический износ или шумовое загрязнение.

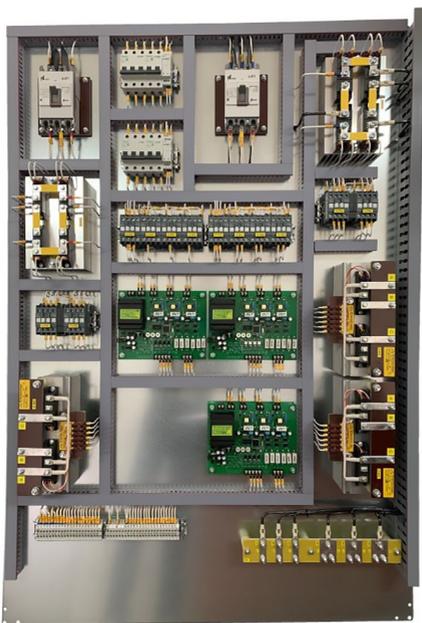


Рис. 2. Щит управления на основе твердотельных элементов

Тогда если он имеет так много преимуществ по сравнению с электромеханическим АВР, почему его не так часто используют? Ответ достаточно прост, помимо таких отличных преимуществ тиристорные АВР имеют и большие недостатки. Одни из основных – это их цена, такие АВР достаточно дорогие. Например, одно трехфазное твердотельное реле стоит около пяти тысяч рублей (5000 рублей) [5], а в схемах используется не одно такое реле. Также тиристорные АВР подвержены к разному роду внешних воздействий, основным из которых является электромагнитная обстановка, которая будет наводить помехи на систему АВР, и АВР будет работать некорректно или вовсе выйдет из строя. Чтобы избежать таких проблем с электромагнитной обстановкой необходимо дополнительные меры по защите тиристорного АВР, что приводит к увеличению цены на установку такой системы в разы. Также при выходе из строя элемента электроники или микроэлектроники приводит к затрудненной замене поврежденной части и удорожанию, так как приходится менять весь твердотельный аппарат, а не вышедший из строя элемент в нем.

### **АВР с микропроцессорной системой управления**

Перейдем к рассмотрению АВР с микропроцессорной системой управления. Такой тип АВР делится на два условных подраздела: АВР на основе программируемых логических контроллеров и АВР на микроконтроллерах. Их отличие заключается только в том, что АВР на основе программируемых логических контроллеров имеет ограниченный функционал, прописанный в контроллере с помощью логических действий, то есть составлять программу возможно только из последовательности логических действий, а АВР на микроконтроллере возможно полноценное программирование контроллера, то есть возможно писать более гибкую программу для заданных задач. АВР с микропроцессорной системой управления являются самыми дорогими из все типов АВР. Более дешевым из двух рассмотренных типов микропроцессорных систем управления является контроллер с программируемой логикой, его цена начинается от пятидесяти тысяч рублей (50 000 рублей) [5], и это цена только за сам контроллер, для полной системы АВР необходимо еще приобрести механическую часть, а цены на программируемый микроконтроллер начинаются от

двухсот пятидесяти тысяч рублей (250 000 рублей) [5]. Это один из основных минусов данного типа АВР.

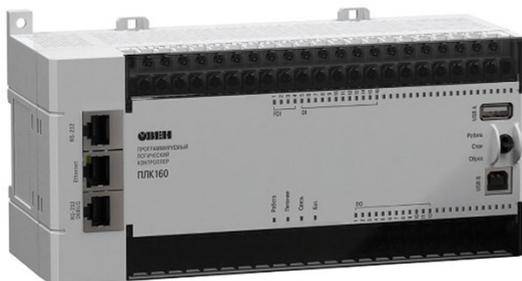


Рис. 3. Программируемый микроконтроллер



Рис. 4. Программируемый логический контроллер

Теперь разберем более подробно в общем тип АВР с микропроцессорной системой управления.

1. Технические ограничения:

- повышенная чувствительность к электромагнитным помехам;
- необходимость защиты от перенапряжений;
- ограничения по рабочему диапазону температур;
- зависимость от качества электропитания.

2. Временные характеристики:

- быстроедействие всей системы, в отличие от механических АВР;

- задержки при обработке сигналов;
  - время реакции зависит от производительности процессора;
  - возможные «зависания» при обработке большого количества данных.
3. Надежность и отказоустойчивость:
- сложность визуальной диагностики внутренних неисправностей;
  - из-за высокого количества элементов в составе контроллера увеличивается шанс поломки всей системы, так как выход из строя одного элемента приводит к неисправности всей системы;
  - риск программных сбоев;
  - необходимость регулярного обновления прошивки;
  - возможность конфликтов между программами.
4. Эксплуатационные особенности:
- повышенные требования к обслуживанию;
  - необходимость квалифицированного персонала;
  - сложность настройки и конфигурирования;
  - длительное время на пусконаладочные работы.
5. Экономические аспекты:
- высокая стоимость оборудования;
  - значительные затраты на обслуживание;
  - необходимость резервного программного обеспечения;
  - повышенные затраты на обучение персонала.
6. Безопасность и защита:
- уязвимость к кибератакам;
  - необходимость защиты каналов связи;
  - сложность обеспечения информационной безопасности;
  - риск несанкционированного доступа.
7. Интеграционные особенности:
- сложность взаимодействия с устаревшим оборудованием;
  - необходимость дополнительных протоколов связи;
  - есть возможность интегрирования контроллера в систему диспетчеризации;
  - ограничения по количеству подключаемых устройств;
  - сложность масштабирования системы.

8. Климатические факторы:

- повышенные требования к условиям эксплуатации;
- необходимость защиты от пыли и влаги;
- зависимость от стабильности электропитания;
- ограничения по влажности и температуре.

9. Функциональные возможности и ограничения:

- возможность реализации нестандартных алгоритмов;
- самодиагностика систем управления;
- зависимость от качества программного обеспечения;
- ограничения по количеству одновременно обрабатываемых событий;
- необходимость периодического обновления баз данных;
- возможность подключения сенсорного экрана для управления с него частью системы или всей системой и наглядного осмотра работы системы.

10. Сервисные особенности:

- необходимость регулярного резервного копирования;
- сложность восстановления после сбоев;
- повышенные требования к документации;
- необходимость специализированного программного обеспечения для обслуживания.

При проектировании систем АВР на основе контроллеров необходимо предусматривать дополнительные меры по обеспечению надежности, включая:

- резервирование каналов связи;
- защиту от электромагнитных помех;
- системы мониторинга состояния;
- возможность быстрого восстановления после сбоев;
- механические блокировки для критических операций.

Также важно учитывать необходимость регулярного технического обслуживания и наличия квалифицированного персонала для поддержки системы, что существенно влияет на общую стоимость владения оборудованием.

### **Выводы**

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Автоматическое включение резерва является критически важным элементом современных систем электроснабжения, обеспечивающим надежность и бесперебойность работы электрооборудования.

Анализ требований к современным системам АВР показал, что они должны обладать комплексными функциональными возможностями, включающими мгновенную готовность к действию, продвинутые защитные функции, оптимизированные временные характеристики и возможности контроля параметров электроснабжения. Особое внимание уделяется вопросам синхронизации и совместимости с существующими сетями, а также способности к автоматическому восстановлению доаварийного режима.

Важным аспектом является способность современных АВР функционировать в различных режимах сети, демонстрировать устойчивость к электромагнитным помехам и обеспечивать надежную работу в широком диапазоне условий эксплуатации. Это достигается благодаря совершенствованию как механических частей (коммутационных устройств), так и органов управления (реле, контроллеров).

Особую перспективность демонстрируют АВР на основе микроконтроллеров, которые обладают рядом существенных преимуществ:

- 1) программируемость и гибкость настроек под конкретные задачи;
- 2) возможность реализации сложных алгоритмов управления;
- 3) повышенная точность измерений и контроля параметров;
- 4) расширенные диагностические функции;
- 5) возможность удаленного мониторинга и управления;
- 6) способность к самодиагностике и предупреждению неисправностей;
- 7) меньшая чувствительность к электромагнитным помехам;
- 8) более высокая надежность за счет отсутствия механических частей в цепи управления.

Практическая значимость исследования заключается в том, что внедрение современных систем АВР позволяет существенно повысить надежность электроснабжения критически важных объектов, минимизировать время простоя оборудования и предотвратить потенциальные аварийные ситуации. При этом особое значение имеет

способность систем АВР обеспечивать успешный самозапуск электродвигателей и предотвращать несинхронные включения.

Перспективы дальнейших исследований связаны с разработкой более совершенных алгоритмов управления системами АВР, повышением их адаптивности к различным условиям эксплуатации и интеграцией с современными цифровыми системами управления электросетевыми комплексами.

Таким образом, внедрение автоматических систем ввода резерва на основе микроконтроллеров является наиболее оптимальным решением для обеспечения надежности современных систем электроснабжения и должно рассматриваться как приоритетное направление при проектировании и модернизации электротехнических комплексов различного назначения.

#### Литература

1. Правила устройства электроустановок: 7-е издание (ПУЭ). Главгосэнергонадзор России. – М. : Изд-во ЗАО «Энергосервис», 2007. – 610 с.
2. СП 158.13330.2014. Здания и помещения медицинских организаций правила проектирования. URL: <https://sptg.ru/upload/iblock/dc1/t22jx7nwwwr3409grt20bsp033fgv8g1.pdf>
3. ГОСТ 32396-2021 Устройства вводно-распределительные для жилых и общественных зданий. URL: [https://normadocs.ru/gost\\_32396-2021?ysclid=m8zuvj00xh31883216/](https://normadocs.ru/gost_32396-2021?ysclid=m8zuvj00xh31883216/)
4. *Ксенофонтова Е. А.* Магистерская диссертация «Интеллектуальная система автоматического ввода резерва электропитания технологического оборудования автомобильного кластера».
5. URL:[https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/13321/1/%D0%9A%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%84%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%95.%D0%90.\\_%D0%AD%D0%AD%D0%A2%D0%BC-1804%D0%B0.pdf/](https://dspace.tltsu.ru/bitstream/123456789/13321/1/%D0%9A%D1%81%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D1%84%D0%BE%D0%BD%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%B0%20%D0%95.%D0%90._%D0%AD%D0%AD%D0%A2%D0%BC-1804%D0%B0.pdf/)
6. ЭТМ комплексный поставщик продуктов и решений для инженерных систем. URL: <https://www.etm.ru/>

**УДК 621.311.1+620.98**

*Андрей Андреевич Костиков,*

студент

*Владимир Алексеевич Черемисин,*

студент

*Никита Андреевич Чабаненко,*

студент

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

*Виктор Иванович Михайлов,*

ст. науч. сотр.

(Военная академия

материально-технического обеспечения)

*E-mail: plot.874635@yandex.ru,*

*Vova.cher25072004@mail.ru,*

*Chabanenko\_04@mail.ru*

*Andrey Andreevich Kostikov,*

student

*Vladimir Alekseevich Cheremisn,*

student

*Nikita Andreevich Chabanenko,*

student

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

*Victor Ivanovich Mikhailov,*

senior research worker

(Military Academy

of Logistics)

*E-mail: plot.874635@yandex.ru,*

*Vova.cher25072004@mail.ru,*

*Chabanenko\_04@mail.ru*

**СПОСОБЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОМОДУЛЕЙ  
СИСТЕМ ГАРАНТИРОВАННОГО  
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНЫХ  
ОБЪЕКТОВ ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

**METHODS OF MODELING ENERGY MODULES  
OF GUARANTEED POWER SUPPLY SYSTEMS  
FOR CRITICALLY IMPORTANT URBAN  
INFRASTRUCTURE FACILITIES**

В данной статье рассматриваются способы оптимизации энергомодулей по составу оборудования. Энергомодули применяются для питания критически важных объектов городской инфраструктуры с применением независимого источника электроснабжения. При снижении качества электроснабжения или его полном пропадании на критически важных объектах возможны не только потери материального характера, но и возникновение угрозы жизни и благополучию людей. Особенностью энергомодулей является возможность одновременной выработки электрической и тепловой энергии с минимизацией потерь от нагрева. В настоящее время остро стоит вопрос оптимизации состава энергомодулей для снижения затрат на их производство и эксплуатацию с одновременным улучшением их характеристик. В частности, для решения данных задач будет рассмотрен конечно-автоматный метод с примерами его применения.

*Ключевые слова:* энергомодуль, критически важные объекты, конечно-автоматный метод, метод конечных автоматов, когенерация энергии.

This article discusses ways to optimize energy modules by equipment composition. Energy modules are used to power critical urban infrastructure facilities using an independent power supply source. With a decrease in the quality of electricity supply or its complete loss at critical facilities, not only material losses are possible, but also a threat to human life and well-being. A special feature of energy modules is the possibility of simultaneous generation of electrical and thermal energy while minimizing heating losses. Currently, the issue of optimizing the composition of energy modules is acute in order to reduce the costs of their production and operation while improving their characteristics. In particular, a finite automaton method with examples of its application will be considered to solve these problems.

*Keywords:* energy module, critical objects, finite automaton method, finite automata method, energy cogeneration.

Критически важные объекты (КВО) городской инфраструктуры представляют собой объекты, нарушение функционирования которых может нанести существенный ущерб национальной безопасности государства и его гражданам в экономической, социальной и других сферах.

К КВО традиционно относятся военные объекты, здания администрации, учебные заведения, больницы, аэропорты и т.п.

Электроснабжение критически важных объектов должно осуществляться с соблюдением установленного качества, в первую очередь нормированным напряжением и частотой. Не допускается пропадание питания или изменение его характеристик в аварийной ситуации, влекущее за собой отключение или выход из строя оборудования. Такие объекты запитываются по первой или первой особой категории электроснабжения согласно ПУЭ.

В последнем случае требуется не менее трех вводов с применением независимого источника питания, например автономного электрогенератора. При этом система электроснабжения (СЭС) КВО конфигурируется или дополняется соответствующей системой гарантированного электроснабжения (СГЭС)

Реализация систем гарантированного электроснабжения (СГЭС) возможна с применением:

- дизель-генераторов;

- систем бесперебойного питания на базе статических преобразователей электроэнергии (ИБП);
- комбинированных энергомодулей на базе совместного применения статических и электромашинных преобразователей.

Как показали исследования, приведенные в работах [1-4] наиболее оптимальные для КВО характеристики СГЭС в настоящее время могут быть обеспечены путем дооснащения их энергомодулями. В общем случае энергомодуль включает в себя: двигатель внутреннего сгорания, теплообменник и электрогенератор, блок управления. Данная система примечательна способностью отдавать сопоставимое количество тепловой мощности с электрической мощностью. Это позволяет экономить на топливе и не устанавливать систему электроотопления. Данный вид производства энергии также называют когенерацией.

Актуальным в настоящее время является вопрос оптимизации энергомодулей по составу оборудования. В этой связи были рассмотрены способы их моделирования и оптимизации.

Структурно-топологический метод используется для получения информации о характере функционирования сложной системы в задачах оптимизации, планирования или синтеза системы.

Данный метод моделирования основан на использовании двух подходов – структурного и топологического. Структурный подход предполагает разбиение сложной системы на ряд более простых подсистем или структурных состояний, смена которых происходит при выполнении определенных логических условий относительно координат системы. На верхнем уровне решается задача логического управления структурой системы, а на нижнем – управления непосредственной динамикой подсистем.

Топологический подход позволяет моделировать взаимодействие структурных элементов и записывать модели всех элементов в единой универсальной форме записи.

Например, структурно-топологическое описание используется при автоматизации процессов мониторинга состояния сложных технических объектов.

Метод конечных автоматов используется для описания схем, в которых значение выходных сигналов зависит не только от значе-

ний входных сигналов, поступающих в данный момент, но и от значений сигналов, подаваемых на эти входы ранее, то есть эти схемы учитывают предысторию входных сигналов.

Конечный автомат – это упрощенная модель компьютера с конечным числом состояний. У него есть таблица переходов, текущее состояние автомата, стартовое состояние и заключительное состояние. Таблица переходов хранит переходы для текущего состояния и входного символа. При моделировании с использованием конечных автоматов можно использовать, например, инструмент *Stateflow* в составе *Simulink* или среду *SimInTech*, где есть специальная библиотека блоков для создания моделей систем в виде конечных автоматов.

Метод переменных состояний используется в теории автоматического управления для анализа и расчета сложных систем с несколькими передаточными функциями, входными воздействиями и реакциями системы. В этом методе вместо передаточных функций, связывающих вход с выходом, используются дополнительные переменные состояния, которые описывают систему.

Состояние системы – это совокупность значений переменных, знание которых, наряду с входными функциями и уравнениями, описывающими динамику системы, позволяет определить ее будущее состояние и выходную переменную.

Метод множителей Лагранжа основан на нахождении условного экстремума функции при соблюдении ограничений равенства. Метод заключается в преобразовании ограниченной задачи в такую форму, чтобы производный тест неограниченной задачи все еще мог быть применен.

Метод Ритца. Прямой метод нахождения приближительного решения краевых задач вариационного исчисления. Пробная функция, которая должна минимизировать определенный функционал, выбирается в виде суперпозиций известных функций, которые удовлетворяют граничным условиям. При этом задача сводится к поиску неизвестных коэффициентов суперпозиции. Позволяет решать задачи по нахождению функции в заданном классе, которые доставляют экстремальное значение заданному функционалу.

Рассмотрев каждый из этих методов, наиболее предпочтительным можно считать метод конечных автоматов. Он отличается удобством

для восприятия, относительной простотой и наличием программ для его реализации.

При использовании конечно-автоматного метода моделирования легко структурировать описание логики поведения. Корректность работы при использовании автоматов закладывается еще на этапе проектирования, благодаря графическому представлению, обеспечивающему следующие возможности:

- наглядно представляется поведение управляющих автоматов;
- отображаются желаемые состояния;
- отражается динамика и условия переходов автомата между состояниями;
- можно легко увидеть возможные ошибки в проектировании.

Модель конечного автомата системы предполагает, что в любое время система находится в одном из возможных состояний. При получении входного сигнала система может изменить свое состояние.

Основными являются две модели конечных автоматов: Мили и Мура.

Автомат Мили описывается следующими формулами:

1. В зависимости от внутреннего состояния автомата и входного сигнала в настоящий момент различается внутреннее состояние автомата в следующий момент времени.

$$x(t+1) = \phi(x(t), \rho(t))$$

2. В зависимости от внутреннего состояния автомата и входного сигнала в настоящий момент различается выходной сигнал автомата в настоящий момент времени.

$$\lambda(t) = \psi(x(t), \rho(t))$$

Функции переходов и выходов автомата Мура выглядят следующим образом:

$$x(t+1) = f(x(t), \rho(t))$$

$$\lambda(t+1) = \psi(x(t+1)) = \psi(\phi(x(t), \rho(t))) = \psi'(x(t), \rho(t))$$

У автомата Мура функция выходов зависит от его внутреннего состояния.

Задание конечного автомата с помощью графа предполагает построение связного графа, вершины которого соответствуют внутренним состояниям автомата, а дуги определяют переходы между состояниями.

Для автомата Мили (рис. 1):

Две вершины графа автомата  $x_i$  и  $x_j$  соединяются дугой, направленной от  $x_i$  к  $x_j$ , если в автомате имеется переход из состояния  $x_i$  в состояние  $x_j$ . Дуге графа приписывается входной сигнал  $\rho$  и выходной сигнал  $\lambda$ . Если переход автомата из состояния  $x_i$  в состояние  $x_j$  происходит под воздействием нескольких входных сигналов, то дуге приписываются все эти сигналы через знак  $\vee$  (дизъюнкции).

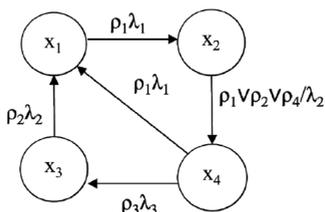


Рис. 1. Автомат Мили

В автомате Мура выходной сигнал зависит только от внутреннего состояния автомата, поэтому он приписывается вершинам графа, соответствующим определенному внутреннему состоянию автомата (рис. 2).

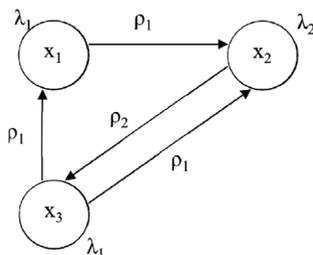


Рис. 2. Автомат Мура

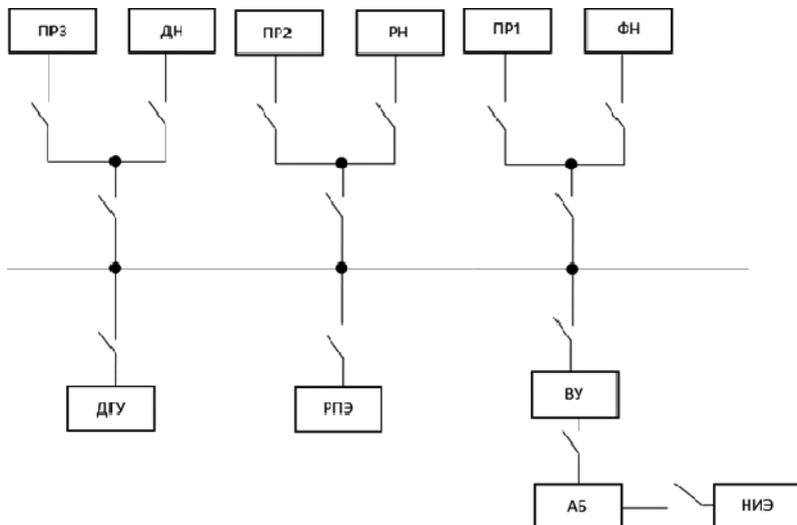


Рис. 3. Упрощенная функциональная схема энерго модуля

- ДГУ – двигатель-генераторная установка
- РПЭ – реверсивный преобразователь электроэнергии
- АБ – аккумуляторная установка
- НИЭ – нетрадиционный источник электроэнергии
- ВУ – выпрямительное устройство
- ДН – гарантированная нагрузка дежурного режима
- РН – гарантированная нагрузка рабочего режима
- ФН – гарантированная нагрузка режима форсировки
- ПР3 – потребители-регуляторы дежурного режима
- ПР2 – потребители-регуляторы рабочего режима
- ПР1 – потребители-регуляторы режима форсировки

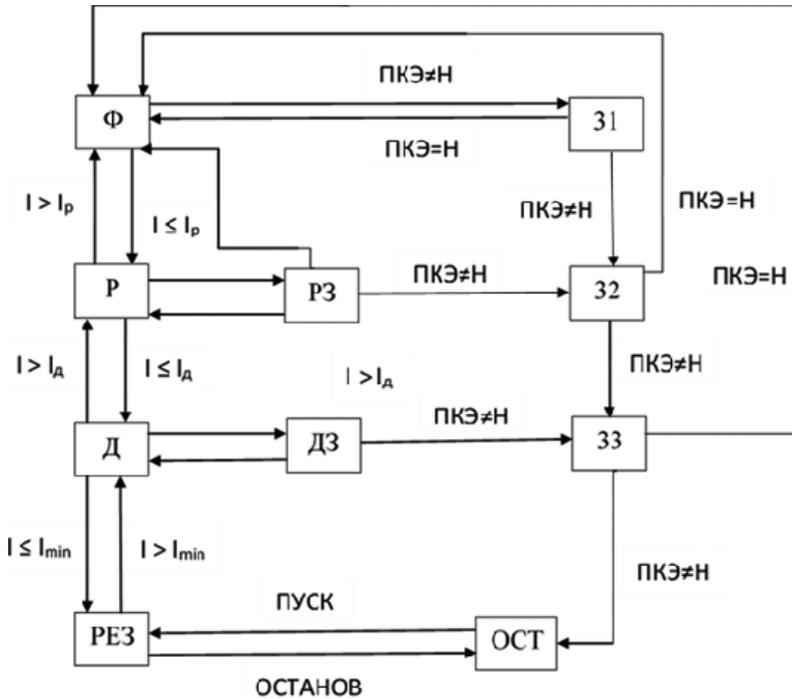


Рис. 4. Конечно-автоматная модель энергомодуля

- $I_{min}$  – минимальная нагрузка
- $I_d$  – максимальная нагрузка дежурного режима
- $I_p$  – максимальная нагрузка рабочего режима
- ПКЭ – показатель качества электроэнергии
- Н – норма

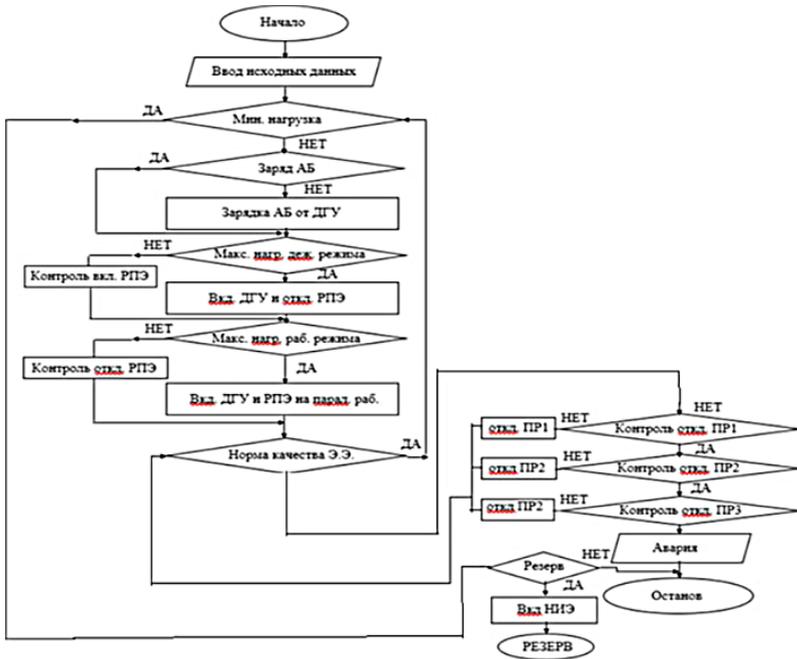


Рис. 5. Алгоритм работы РКБЖ

### Заключение

В ходе работы был выполнен комплексный анализ требований к электроснабжению критически важных объектов и существующих вариантов резервирования. Отмечено, что наиболее эффективным решением является использование энергомодулей с режимом когенерации, который обеспечивает не только надежное электроснабжение, но и эффективное использование вырабатываемого тепла.

В работе обоснован выбор конечно-автоматного метода для моделирования поведения системы. Этот метод оказался оптимальным благодаря его наглядности, относительной простоте и наличию программных средств для реализации. Применение данного метода позволило разработать функциональную схему (рис. 3, 4) и алгоритм работы энергомодуля с режимом когенерации энергии (рис. 5).

Разработанный алгоритм работы обеспечивает оптимальное функционирование системы во всех режимах, учитывая различные параметры нагрузки и показатели качества электроэнергии. Это гарантирует бесперебойное энергоснабжение критически важного объекта даже в нештатных ситуациях.

Проведенное исследование демонстрирует высокую эффективность применения конечно-автоматного метода моделирования для оптимизации структуры и функционирования энергетических систем критически важных объектов.

### Литература

1. Прутчиков И. О., Камлюк В. В. Методика оценки технического уровня и выбора рационального облика систем комплексной защиты от угроз безопасности автономных стационарных объектов специальной и социальной инфраструктуры // Морской вестник. 2021. № 1(77). С. 80.

2. Прутчиков И. О., Сизько Д. В., Куртц И. Д. Анализ особенностей и перспектив применения методов теории принятия решения для структурно-параметрической оптимизации подвижных средств жизнеобеспечения и защиты формирований МТО ВС РФ при их размещении в пунктах временной дислокации дислокации.

В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАН, в 5-ти т., Москва, 2020. С. 496–500.

3. Прутчиков И. О., Фадеев Д. Ю., Сизько Д. В. О необходимости разработки мобильных модулей энергетической безопасности для автономных нестационарных объектов оборонной инфраструктуры.

4. Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения. Сборник трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов. ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики». 2019. С. 165–171.

5. Прутчиков И. О., Михайлов В. И., Руденко А. Е., Лаврентьев А. П. Обеспечение гарантированного электроснабжения автономных объектов с использованием совместно работающих дизель – генераторных установок и статических преобразователей электроэнергии в условиях крайнего севера.

6. Технологическое развитие науки: тенденции, проблемы и перспективы. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. 2018. С. 41–48.

**УДК 621.311.1+620.98**

*Владимир Алексеевич Черемисин,*

студент

*Никита Андреевич Чабаненко,*

студент

*Андрей Андреевич Костиков,*

студент

(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)

*Виктор Иванович Михайлов,*

ст. науч. сотр.

(Военная академия

материально-технического обеспечения)

*E-mail: Vova.cher25072004@mail.ru,*

*Chabanenko\_04@mail.ru,*

*plot.874635@yandex.ru,*

*Siol2507@yandex.ru*

*Vladimir Alekseevich Cheremisin,*

student

*Nikita Andreevich Chabanenko,*

student

*Andrey Andreevich Kostikov,*

student

(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)

*Viktor Ivanovich Mikhailov,*

senior research worker

(Military Academy

of Logistics)

*E-mail: Vova.cher25072004@mail.ru,*

*Chabanenko\_04@mail.ru,*

*plot.874635@yandex.ru,*

*Siol2507@yandex.ru*

## **ОБОСНОВАНИЕ И ВЫБОР МЕТОДА ОПТИМИЗАЦИИ АВТОНОМНОГО ЭНЕРГОМОДУЛЯ СИСТЕМЫ ГАРАНТИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ КРИТИЧЕСКИ ВАЖНОГО ОБЪЕКТА ГОРОДСКОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ**

### **SUBSTANTIATION AND SELECTION OF A METHOD FOR OPTIMIZING AN AUTONOMOUS POWER MODULE OF A GUARANTEED POWER SUPPLY SYSTEM FOR A CRITICALLY IMPORTANT URBAN INFRASTRUCTURE FACILITY**

В статье рассматривается проблема выбора метода оптимизации автономного энерго модуля для критически важного объекта городской инфраструктуры – районной котельной. Представлены характеристики объекта, обоснована необходимость применения автономного энерго модуля в качестве третьего независимого источника электроснабжения для объектов первой особой категории. Рассмотрены и сравнены различные методы оптимизации, обоснован выбор метода анализа иерархий для структурно-параметрической оптимизации мобильного энерго модуля. Разработаны локальные модели оптимального выбора элементов автономного энерго модуля системы гарантированного

электроснабжения. Представлены результаты расчетов и обоснован выбор контейнерного типа установки как наиболее рационального варианта автономного энерго модуля для обеспечения энергетической безопасности городской котельной с помощью метода анализа иерархий.

*Ключевые слова:* автономный энерго модуль, критически важный объект городской инфраструктуры, метод оптимизации, системы гарантированного электроснабжения, метод анализ иерархий.

The article discusses the problem of choosing a method for optimizing an autonomous power module for a critically important urban infrastructure facility – a district boiler house. The characteristics of the facility are presented, and the necessity of using an autonomous power module as a third independent power supply source for facilities of the first special category is substantiated. Various optimization methods are considered and compared, and the choice of a hierarchy analysis method for structural and parametric optimization of a mobile power module is substantiated. Local models of optimal selection of elements of an autonomous power module of a guaranteed power supply system have been developed. The results of calculations are presented and the choice of a container type of installation is justified as the most rational option for an autonomous power module to ensure the energy security of a city boiler house using the hierarchy analysis method.

*Keywords:* autonomous power module, critically important urban infrastructure facility, optimization method, guaranteed power supply systems, hierarchy analysis method.

Городская районная котельная является критически важным объектом инфраструктуры, обеспечивающим подачу тепловой энергии для нужд отопления и горячего водоснабжения жилых, общественных и промышленных зданий в определенном районе города. Эти объекты играют важную роль в обеспечении комфорта и безопасности жизнедеятельности населения.

Электроснабжение котельной осуществляется по 1-ой особой категории электроснабжения. Электроснабжение осуществляется за счет двух независимых источников питания, питание которых подходит к трансформаторной подстанции городской районной котельной. Так как у объекта 1-ая особая категория электроснабжения, то в качестве третьего независимого источника используем автономный энерго модуль (АЭ), который питает ТП, при выходе из строя двух резервных линий. В нем при помощи АВР происходят аварийные переключения между питающими линиями. Так же в состав энерго модуля

входит комбинированная электроустановка, которая в случае аварии, всю нагрузку котельной берет на себя.

Городские котельные должны быть подключены к электросети таким образом, чтобы обеспечить их непрерывную работу даже в условиях аварии или отключений в общей энергосистеме. Качество электроснабжения должно соответствовать стандартам, установленным для промышленных потребителей, включая параметры напряжения и частоты, а также стабильность подачи электроэнергии. Котельная должна быть спроектирована и построена с учетом принципов энергоэффективности, что включает использование современного энергосберегающего оборудования и технологий.

Системы резервирования и аварийного электроснабжения должны быть спроектированы таким образом, чтобы в случае сбоя в основной электросети автоматически включаться и поддерживать работоспособность котельной. Системы автоматизации должны обеспечивать эффективное управление процессами котельной, включая регулировку подачи топлива, контроль за сгоранием, управление насосами и другим оборудованием.

Таким образом, разработка автономного энерго модуля для городской котельной обоснована потребностью в гибких, надежных и эффективных решениях для обеспечения энергетической безопасности и удовлетворения потребностей городской инфраструктуры.

Автономный мобильный энерго модуль представляет собой переносное устройство, предназначенное для обеспечения электроэнергией в местах, где нет возможности подключения к традиционным источникам питания, или в качестве резервного источника питания.

Рассмотрим функциональную схему мобильного энерго модуля (рис. 1). Энерго модуль получает питание от внешнего источника либо от сети переменного тока, либо при использовании топлива. Синхронный генератор питается от двигателя и преобразует механическую энергию в электрическую, которая идет к потребителю.

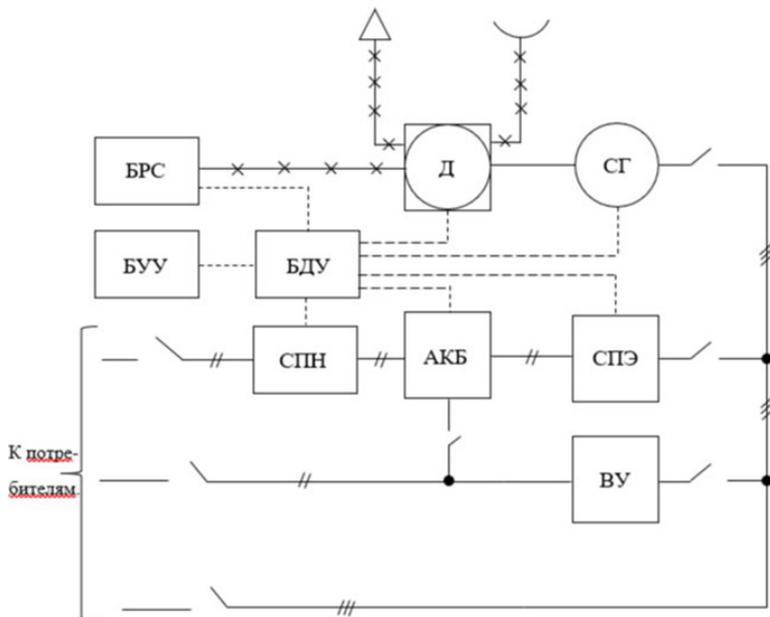


Рис. 1. Функциональная схема энергомодуля с технологиями ЧРПЭ

Статический преобразователь электроэнергии (СПЭ) – основной элемент системы, который преобразует входящее напряжение переменного тока в напряжение с регулируемой частотой. Это устройство состоит из выпрямителя, который преобразует входящий переменный ток в постоянный, и инвертора, который преобразует постоянный ток обратно в переменный, но с возможностью регулирования частоты выходного напряжения. Блок дистанционного управления – электронный блок, который регулирует работу преобразователя частоты, основываясь на входных сигналах от датчиков или внешних команд управления. Выпрямительное устройство – элемент, который преобразует переменный ток в постоянный, в случае данной схемы предназначен для питания потребителей постоянного тока.

На основе анализа проблем, стоящих перед мобильной техникой в отраслях городского хозяйства, сформулированы основные

технические требования к АЭ: многофункциональность; модульная компоновка на основе типизации и конструктивной унификации; многотопливность, энергоэффективность; энергонасыщенность мобильного энергетического средства выше 20 кВт/т; утилизация сбросового тепла; автономная работа энергетических модулей; согласованность характеристик мобильного энергетического средства (энергетического модуля), технологических модулей и тяговых модулей; высокий коэффициент использования времени смены; возможность параллельной работы энергомодуля с энергосистемой; возможность применения энергомодуля в качестве резервного источника энергии; обеспечение высокого качества получаемой электрической и тепловой энергии; надежность, ресурс и эффективность функционирования энергомодуля; типизация и унификация мобильного парка для отраслей городского хозяйства, энергетического оборудования и комплектующих, топлив и моторных масел; топливная экономичность, затраты на техническое обслуживание и ремонт; защита окружающей среды при использовании энергетического оборудования; ремонтпригодность; транспортабельность; высокий уровень интеллектуализации и роботизации; демпфирование колебаний в конструкции.

Актуальным в настоящее время является вопрос оптимизации энергомодулей по составу оборудования. В этой связи рассмотрим способы их моделирования.

Метод ранговой корреляции – это непараметрический метод корреляционного анализа, предназначенный для описания зависимости между признаками, представленными в порядковой (ранговой) шкале. Процедура установления ранговой корреляции заключается в упорядочении изучаемых объектов в отношении некоторого признака, то есть им приписываются порядковые номера – ранги (по два номера в соответствии с двумя наблюдаемыми признаками, между которыми исследуется корреляция).

Достоинства метода: возможность ранжировать по признакам, которые нельзя выразить численно; возможность ранжировать оценки разных экспертов и находить их корреляции друг с другом; применение для оценки устойчивости тенденции динамики; подходит для малых выборок. Недостатки метода: одинаковым разностям рангов могут соответствовать совершенно отличные разности значений при-

знаков; ограниченная интерпретация результатов; потеря информации при преобразовании количественных данных в ранги.

«Метод Дельфи» является самым популярным из экспертных методов, и его популярность напрямую связана с эвристическими возможностями самого метода, позволяющими решать сложные комплексные задачи. Сущность метода заключается в последовательном анкетировании мнений экспертов по интересующей организаторов экспертизы проблеме.

Метод предполагает серию опросов экспертов, не имеющих возможности вступать друг с другом в непосредственный контакт и получающих информацию о заключениях других лишь по их письменным отчетам. Цель метода заключается в вынесении объективной и точной оценки существующих альтернатив с целью принятия оптимальных и социально приемлемых решений.

Достоинства метода: использование количественных показателей, позволяющих делать точные и аргументированные заключения; уменьшение колебаний по совокупности индивидуальных ответов; снижение влияния малоквалифицированных экспертов на групповую оценку. Недостатки метода: нехватка времени, которое отведено эксперту на обдумывание проблемы; возможность согласия эксперта с мнением большинства без обоснования; необходимость сложной организации экспертизы.

Симплекс-метод – алгоритм решения оптимизационной задачи линейного программирования путем перебора вершин выпуклого многогранника в многомерном пространстве. Сущность метода: построение базисных решений, на которых монотонно убывает линейный функционал, до ситуации, когда выполняются необходимые условия локальной оптимальности.

Достоинства симплекс-метода: универсальность применения для задач линейного программирования; рационализация вычислений; гарантированное нахождение оптимального решения при его существовании; возможность работы с двойственными задачами. Недостатки симплекс-метода: экспоненциальная сходимость в худшем случае; высокие временные затраты в отдельных случаях; неэффективность при больших размерах задачи; требования к базису и ограничения на переменные; сложность интерпретации результатов.

Метод анализа иерархий (МАИ) разработан американским математиком, Томасом Л. Саати, который написал о нем книги, разработал программные продукты и в течение 20 лет проводил симпозиумы на эту тему. МАИ широко используется на практике и активно развивается учеными всего мира. В его основе наряду с математикой заложены и психологические аспекты. Метод анализа иерархий используется во всем мире для принятия решений в разнообразных ситуациях: от управления на межгосударственном уровне до решения отраслевых и частных проблем в бизнесе, промышленности, здравоохранении и образовании.

Метод анализа иерархий, или подход аналитической иерархии предполагает декомпозицию проблемы на простые составляющие части и обработку суждений лица, принимающего решения (ЛПР). В результате определяется относительная значимость исследуемых альтернатив для всех критериев, находящихся в иерархии. Постановка задачи, решаемой с помощью метода анализа иерархий, заключается обычно в следующем: дано: общая цель решения задачи; критерии оценки альтернатив; альтернативы. Требуется: выбрать наилучшую альтернативу.

Подход МАИ состоит из совокупности этапов:

1. Структуризация задачи виде иерархической структуры с несколькими уровнями: цели, критерии, альтернативы. Для описания иерархической структуры МАИ используются специальные термины. Каждый уровень включает в себя узлы. Элементы, которые выходят из узла, обычно называют его детьми (дочерними элементами). Элементы, из которых исходит узел, называются родительскими. Группы элементов, имеющих общий родительский элемент, называют группами сравнения. Родительские элементы альтернатив, как правило, исходящие из разных групп сравнения, обозначаются как покрывающие критерии.

2. Парное сравнение элементов каждого уровня лицом, принимающим решения. Результаты сравнения имеют числовой характер.

3. Вычисление коэффициентов важности для элементов каждого уровня. Проверка согласованности суждений ЛПР.

4. Подсчет количественной оценки качества альтернатив. Выбор лучшей альтернативы.

Для установления относительной важности элементов иерархии используется шкала отношений (табл. 1). Данная шкала позволяет ЛПР ставить в соответствие степеням предпочтения одного сравниваемого объекта перед другим некоторые числа.

Таблица 1

### Шкала отношений в МАИ

1	Равная важность
3	Незначительное превосходство одного критерия над другим
5	Существенная или сильное превосходство одного критерия над другим
7	Значительное превосходство одного критерия над другим
9	Очень сильное превосходство одного критерия над другим
2, 4, 6, 8	Промежуточные значения между двумя соседними суждениями. Ситуация, когда необходимо компромиссное решение

Затем на основе данных оценок формируется матрица (табл. 2), в которой если элемент  $i$  более важен, чем элемент  $j$ , то клетка  $(i, j)$ , которая соответствует строке  $i$  и столбцу  $j$ , должна быть заполнена целым числом, а клетка  $(j, i)$ , которая соответствует строке  $j$  и столбцу  $i$ , должна быть заполнена дробью.

Достоинства метода: позволяет понятным и рациональным образом структурировать сложную проблему принятия решений в виде иерархии; дает возможность сравнить и выполнить количественную оценку альтернативных вариантов решения; позволяет в интерактивном режиме найти вариант, наилучшим образом согласующийся с пониманием сути проблемы. Недостатки метода: критерий оценки качества работы эксперта нуждается в совершенствовании; возникают вопросы при интерпретации результатов, связанные с критерием качества работы эксперта.

Таблица 2

## Пример составления матрицы МАИ

Стоимость производства K1	A1	A2	A3	Компоненты собственного вектора W1	Нормализованные компоненты собственного вектора приоритетов $\hat{w}_1$
A1	1	7	3	2,76	0,69
A2	1/7	1	3	0,76	0,19
A3	1/3	1/3	1	0,48	0,12
Сумма по столбцу СВ	1,5	8,3	7	4	
$\lambda_{\max} = 3,44$ ; ИС = 0,22; ОС = 0,379					

Метод множителей Лагранжа – метод нахождения условного экстремума функции при соблюдении ограничений равенства. Основная идея метода заключается в том, чтобы преобразовать ограниченную задачу в такую форму, чтобы производный тест неограниченной задачи все еще мог быть применен.

Достоинства метода: простота и универсальность; преобразование задачи с ограничениями в безусловную; наглядность и прозрачность метода; хорошая сходимость для выпуклых задач оптимизации. Недостатки метода: метод применим только для задач непрерывной оптимизации; требует гладкости и дифференцируемости целевой функции и ограничений; для невыпуклых задач не гарантирует нахождения глобального оптимума; может сходиться медленно при плохом выборе множителей Лагранжа.

По итогам сравнения разных методов оптимизации был выбран метод анализа иерархий.

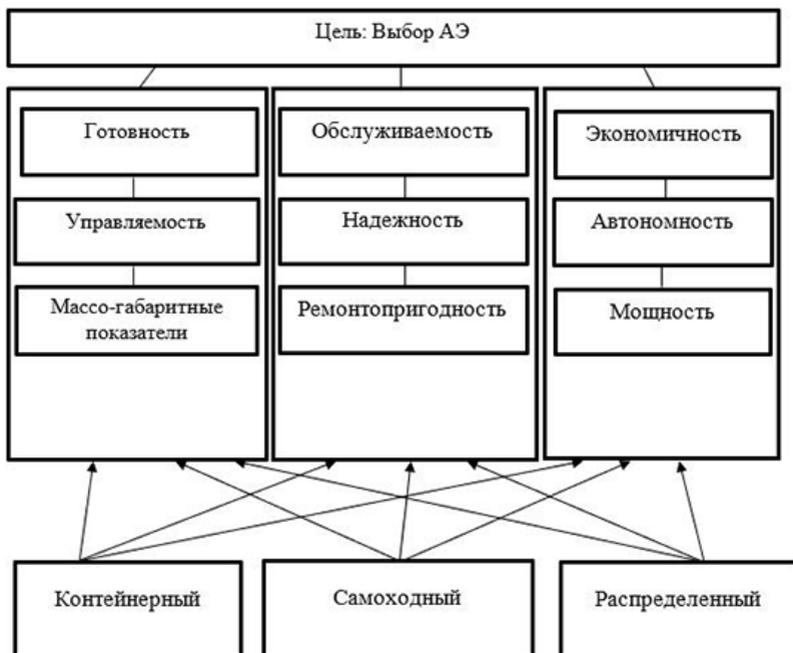


Рис. 2. Иерархическая модель проблемы выбора типа АЭ

Для расчетов по методу МАИ, согласно разработанной методике, была выбрана специальная программа расчетов по методу МАИ 123АНР. В качестве исходной модели выбора рационального варианта АЭ по методу МАИ, согласно разработанной методике, была создана следующая иерархическая структура (рис. 2). Созданная иерархическая модель имеет 3 уровня и 13 узлов. На первом уровне отображена цель, отражающая проблему выбора типа АЭ, на втором уровне отражены критерии – основные показатели. На третьем уровне расположены сравниваемые типы АЭ.

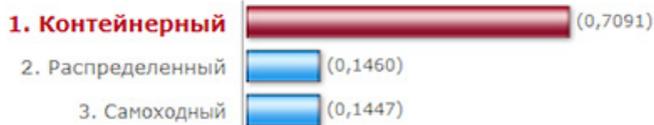
Следующим этапом моделирования, согласно разработанной методике, является сравнение критериев в зависимости от уровня значимости, с последующим составлением матриц парных сравнений (рис. 3).

Экономичность	Контейнерный	Самоходный	Распределенный
Контейнерный	1	5	5
Самоходный	1/5	1	4
Распределенный	1/5	1/4	1

CI: 0,1086 CR: 0,2089  $\lambda$ : 3,2173

Рис. 3. Пример матрицы парных сравнений, полученный 123АНР

### мое решение



### важность критериев



Рис. 4. Результат расчетной оценки и выбора на ПЭВМ с помощью 123АНР АЭ

На финальном этапе расчетов по разработанной методике применением *123АНР* проводится сравнительная оценка и выбор рационального варианта АЭ с выводом результатов в числовом или графическом виде. Так, согласно принятым исходным данным, расчеты на ПЭВМ с помощью *123АНР* по разработанной методике показали, что наиболее рациональным вариантом АЭ является контейнерный тип установки (рис. 4).

В результате проведенного исследования решена задача выбора и структурной оптимизации автономного энерго модуля для городской районной котельной как критически важного объекта инфраструктуры.

В работе обоснована необходимость применения мобильного АЭ в качестве третьего независимого источника энергоснабжения для объектов первой особой категории. Определены требования конструкции и эксплуатации АЭ. Выполнен сравнительный анализ методов оптимизации. Главным преимуществом МАИ по сравнению с другими методами, является наличие и возможность его программной реализации и простота пользовательского интерфейса соответствующего пакета прикладных программ. На основе расчетов с использованием программы *123АНР* определен оптимальный тип АЭ для городской районной котельной – контейнерный тип установки.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и разработке систем резервного энергоснабжения для других критически важных объектов городской инфраструктуры, что способствует повышению их энергетической безопасности и надежности функционирования.

### Литература

1. Саати Т. Принятие решений. Метод анализа иерархий. – М. : Радио и связь, 1993. – 278 с.
2. Прутчиков И. О., Камлюк В. В., Маккавеев А. В. Методика оценки и выбора элементов энергетических систем с использованием метода анализа иерархий // Морской вестник. – 2017. – № 1(61). – С. 47–51.
3. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. – М. : Радио и связь, 1991. – 224 с.
4. Прутчиков И. О., Сизько Д. В., Куртц И. Д. Анализ особенностей и перспектив применения методов теории принятия решения для структурно-

параметрической оптимизации подвижных средств жизнеобеспечения и защиты формирований МТО ВС РФ при их размещении в пунктах временной дислокации. В сборнике: Актуальные проблемы защиты и безопасности. Труды XXIII Всероссийской научно-практической конференции РАРАН, в 5-ти т. Москва, 2020. С. 496-500.

5. Прутчиков И. О., Фадеев Д. Ю., Сизько Д. В. О необходимости разработки мобильных модулей энергетической безопасности для автономных нестационарных объектов оборонной инфраструктуры. В сборнике: Современные транспортные технологии: задачи, проблемы, решения. Сборник трудов III Всероссийской (с международным участием) научно-практической конференции научных, научно-педагогических работников, аспирантов и студентов. ОУ ВО «Южно-Уральский институт управления и экономики». 2019. С. 165–171.

6. Прутчиков И. О., Михайлов В. И., Руденко А. Е., Лаврентьев А. П. Обеспечение гарантированного электроснабжения автономных объектов с использованием совместно работающих дизель-генераторных установок и статических преобразователей электроэнергии в условиях крайнего севера. В сборнике: Технологическое развитие науки: тенденции, проблемы и перспективы. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции. 2018. С. 41–48.

**УДК 534.28**

*Сергей Сергеевич Косицкий,*  
старший оператор  
*Михаил Алексеевич Заболотских,*  
старший оператор  
(Научная рота военно-системных  
исследований материально-  
технического обеспечения  
Вооруженных Сил  
Российской Федерации)  
*Владимир Николаевич Сопот,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Научно-исследовательский  
институт военно-системных  
исследований материально-  
технического обеспечения Вооруженных  
Сил Российской Федерации)  
*E-mail: sergey\_kositskey2000@mail.ru,*  
*maz-2001@yandex.ru, sopot@mail.ru*

*Sergey Sergeevich Kositskiy,*  
senior operator  
*Mikhail Alekseevich Zabolotskikh,*  
senior operator  
(Scientific Company  
for military-system research  
of logistics  
of the Armed Forces  
of the Russian Federation)  
*Vladimir Nikolaevich Sopot,*  
PhD of Tech. Ec., Associate Professor  
(Scientific Research  
Institute of Military System  
of Logistics  
of the Armed Forces  
of the Russian Federation)  
*E-mail: sergey\_kositskey2000@mail.ru,*  
*maz-2001@yandex.ru, sopot@mail.ru*

**ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЗВУКОИЗОЛЯЦИИ  
МЕЖЭТАЖНЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ В ЖИЛЫХ  
ЗДАНИЯХ**

**PROBLEMS OF SOUND INSULATION  
OF FLOOR-TO-FLOOR CEILINGS  
IN RESIDENTIAL BUILDINGS**

В данной работе проведен анализ основных путей распространения шума в жилых зданиях, выявлены типичные ошибки при устройстве полов и межэтажных перекрытий, приводящие к снижению звукоизоляционных свойств ограждающих конструкций. Рассмотрены возможные негативные последствия недостаточной звукоизоляции и предложены пути их устранения. В статье представлены широко применяемые мероприятия по защите от шума в жилых и общественных зданиях, проанализировано современное состояние нормирования звукоизоляции, а также достоинства и недостатки существующих нормативных документов в этой области. Проведено исследование свойств отдельных материалов, используемых в качестве упругих звукоизоляционных прокладок. Авторами предложена конструкция специальных упругих прокладок для повышения звукоизоляции межэтажных перекрытий.

*Ключевые слова:* ударный шум, звукоизоляция, воздушный шум, жилые помещения, нормативные требования, акустический комфорт.

In this paper, an analysis of the main ways of noise propagation in residential buildings has been carried out, typical errors in the installation of floors and interstorey ceilings have been identified, leading to a decrease in the sound insulation properties of enclosing structures. The possible negative consequences of insufficient sound insulation are considered and ways to eliminate them are proposed. The article presents the widely used measures to protect against noise in residential and public buildings, analyzes the current state of sound insulation regulation, as well as the advantages and disadvantages of existing regulatory documents in this area. The properties of individual materials used elastic sound insulation gaskets have been studied. The authors proposed the design of special elastic gaskets to increase the sound insulation of interstorey floors.

*Keywords:* impact noise, sound insulation, air noise, living quarters, regulatory requirements, acoustic comfort.

Звукоизоляционные характеристики ограждающих конструкций (стен и перекрытий) определяются их способностью ослаблять шум, проникающий из соседних помещений. В жилых помещениях шум подразделяется на воздушный, ударный и структурный. Дополненным источником акустического дискомфорта в квартирах служит инженерное оборудование здания. Это особенно актуально для построек из сборного или монолитного железобетона.

В настоящее время квартиры в новостройках преимущественно с так называемой «черновой отделкой». При этом недостаточная звукоизоляция стен и перекрытий характерна как для бюджетных, так и для элитных квартир. Внедрение всех необходимых мероприятий по обеспечению качественной звукоизоляции в проект жилого дома увеличивает общую стоимость строительства минимум на 30–50 % [1]. В советский период частичное пренебрежение требованиям звукоизоляции объяснялось необходимостью увеличения количества доступного жилья.

Сегодня застройщики часто пренебрегают требованиями звукоизоляции в угоду снижению стоимости жилья и увеличению его доступности для покупателей. Покупатели, в свою очередь, стремятся приобрести квартиры большей площади по минимальной цене. Даже на рынке элитной недвижимости вопрос качественной звукоизоляции

только начинает приобретать серьезное значение. Жильцы сталкиваются с проблемами акустического комфорта, как правило, после завершения дорогостоящего ремонта, когда все соседи въехали в дом.

Для устройства надлежащей звукоизоляции перекрытий в панельных зданиях, толщина плиты которых обычно составляет 100 мм, необходимо обеспечить качество конструкции пола на упругих звукоизоляционных прокладках как на этапе разработки проектной документации, так и на стадии строительно-монтажных работ. Однако застройщики часто ограничиваются укладкой линолеума или ламината на вспененном полиэтилене, что приводит к недостаточной звукоизоляции и проникновению даже тихих звуков из соседних квартир. Большинство жалоб от жителей многоквартирных домов связано именно с плохой звукоизоляцией межэтажных перекрытий. Дополнительные факторы, ухудшающие звукоизоляцию, включают появление трещин в конструкциях из-за дефектов строительства, осадочных процессов и старения недолговечных звукоизоляционных материалов [2, 3].

В соответствии с требованиями СП 51.13330.2011 «Защита от шума», для обеспечения комфортных условий проживания в жилых и общественных зданиях необходимо предусматривать ограждающие конструкции, обладающие достаточной звукоизоляцией. Это позволит минимизировать уровень шума внутри помещений, не допуская его превышения установленных предельно допустимых значений. Нормы шумового воздействия определяются в зависимости от времени суток: с 23:00 до 07:00 – 45 дБА (уровень шума работающего холодильника), а с 07:00 до 23:00 – 55 дБА (уровень шума электродрели). Идеальным уровнем шума в ночное время считается 20–25 дБА (шум листвы), однако в многоквартирных домах достичь такого показателя практически невозможно.

Для оценки звукоизоляционных свойств строительных конструкций используются индексы изоляции: воздушного шума  $R_w$  и приведенного уровня ударного шума  $L_{nw}$ . Так, для межэтажных перекрытий  $R_w$  должен быть не менее 52 дБА, а  $L_{nw}$  – не менее 60 дБА. Минимальным требованиям к звукоизоляции отвечает перекрытие с несущей плитой толщиной 100 мм, половые доски в шпунт толщиной не менее 37 мм по лагам 40–80 мм, уложенные на прокладки из супертонкого волокна толщиной 20 мм.

Важно отметить, что введение СП 51.13330.2011 «Защита от шума» привело к изменению численных значений нормативных показателей звукоизоляции  $R_w$  и  $L_{nw}$  по сравнению с действующими ранее строительными нормами и правилами СНиП II-12-77 «Защита от шума». Ранее Министерство юстиции Российской Федерации отказалось зарегистрировать Свод правил СП 23-03–2003 «Защита от шума» в связи с тем, что в нем нормативные показатели звукоизоляции внутренних ограждающих конструкций зданий устанавливались в зависимости от категорий зданий «А», «Б» и «В». При этом уровень звукоизоляции стен и перекрытий квартир категории «А» был призван обеспечить практически полную изоляцию от шума, исходящего от соседей. Для жильцов квартир категории «В» допускалось восприятие звуков шагов и разговоров соседей. Установление таких категорий привело бы к существенному увеличению стоимости квартир категории «А» на 30–50 % по сравнению с квартирами «Б» и «В».

Наиболее эффективным способом решения проблемы звукоизоляции межэтажных перекрытий является использование полов на упругих прокладках. В жилых зданиях, построенных в период с 1960 по 1990 годы, в качестве таких прокладок применялись изделия из силикатных волокон, предназначенные преимущественно для теплоизоляции. К сожалению, эти материалы обладают существенным недостатком – высокой степенью сжимаемости в процессе эксплуатации. Согласно СНиП II-12-77 «Защита от шума», допустимое относительное сжатие таких прокладок составляет от 40 до 65 % от первоначальной высоты. Вследствие этого осадка, пола на 20–40 мм по прокладкам из силикатных волокон приводила к образованию трещин в местах примыкания к стенам. Кроме того, неравномерна осадка пола вызывала разрушение основания (стяжки) и верхнего покрытия. В результате звукоизоляционные характеристики межэтажных перекрытий со временем ухудшались, не отвечая нормируемым параметрам еще до окончания срока службы полов. В связи с этим строители стали использовать в качестве упругих прокладок древесноволокнистые плиты (ДВП), которые обладают меньшей сжимаемостью, но имеют низкие звукоизоляционные характеристики и подвержены биологическому разрушению. По данным СНиП II-12-77, относительное сжатие ДВП составляет 10 %, однако на практике уже через

5 лет эксплуатации оно достигает 30 %. Опыт использования плит из силикатных волокон с вяжущим в качестве упругих прокладок показал, что под воздействием нагрузки они, особенно под лагами, рассыпаются в порошок в местах соединения с вяжущим.

Для повышения звукоизоляции межэтажных перекрытий, выполненных с использованием полов на эластичных прокладках (слой звукоизоляции), в ходе длительной эксплуатации предложен метод изготовления звукоизоляционных прокладок из силикатных волокон без использования связующего. Диаметр волокон составляет от 1 до 6 мкм [4]. Суть данного изобретения заключается в предварительном уплотнении слоя распушенных волокон и фиксации толщины этого слоя, например, путем прошивки иглопробивания. Усилия уплотнения подбираются в соответствии с ожидаемой эксплуатационной нагрузкой. Применение таких прокладок исключает возможность прокладки полов.

К сожалению, СП 23-103–2003 «Проектирование звукоизоляции ограждающих конструкций жилых и общественных зданий» рекомендует использовать недолговечные минераловатные плиты на связующем и прошивные материалы без предварительного уплотнения, допуская их относительное сжатие на 50 %. Это приводит к тому, что уже в течение первого года эксплуатации прокладки под лагами будут сжиматься, что неизбежно приведет к существенному снижению звукоизоляционных характеристик перекрытий, а также к появлению скрипов и трещин в полах. В документе также рекомендованы полиуретановые звукоизоляционные прокладки. Наряду с ними различные компании предлагают материалы на основе резины, полиэстера и синтепона. Однако у полимерных материалов, особенно при нагрузке, происходит интенсивное химическое и механическое разрушение, что со временем ухудшает их эластичность, а следовательно, и звукоизоляционные свойства. Применение полимерных материалов целесообразно лишь с учетом опыта их длительной эксплуатации. Существуют прошивные материалы из распущенного супертонкого волокна диаметром 1–3 мкм, обладающие высокой долговечностью. Однако они также производятся без предварительного уплотнения.

Из всех предлагаемых материалов для звукоизоляции следует выделить многослойные конструкции из стеклоткани. При условии

соответствия заявленных производителем характеристик реальным показателям, такие материалы могут быть рекомендованы к использованию, так как эффективно предотвращают распространение звука по перекрытиям.

Что касается покрытий из линолеума в рулонном и плитном исполнениях, то для обеспечения нормативов звукоизоляции толщина монолитной плиты перекрытия должна составлять не менее 180 мм. В случае применения железобетонных пустотных плит толщиной 220 мм перед укладкой линолеума требуется устройство цементно-песчаной стяжки толщиной 30–50 мм. При обоих вариантах перед финишной отделкой пола необходимо тщательно заделать все имеющиеся отверстия и щели, особенно в пристенных зонах.

В настоящее время проектировщики располагают обширным спектром нормативно-технической документации и информационных ресурсов для обеспечения акустического комфорта в жилых помещениях. К ним относятся государственные стандарты, строительные нормы и правила, своды правил, а также разнообразные руководства, инструкции, рекомендации и пособия по расчету и проектированию звуко- и виброизоляции ограждающих конструкций. Существуют также сборники типовых инженерных решений по звукоизоляции стен и перекрытий, а также предложения и рекомендации различных производителей по применению предлагаемых звукопоглощающих и звукоизолирующих конструкций и материалов.

После изучения данной проблемы, был сделан вывод о том, что на сегодняшний день основным решением является введение на законодательном уровне нормативного документа, требующего обязательного соблюдения разработанных проектных решений по устройству звукоизоляции различных конструкций на всех этапах строительного производства. Предлагаемая мера не позволит выполнить отклонения от проекта, в угоду снижения стоимости жилой площади.

### **Литература**

1. *Цукерников И. Е., Тихомиров Л. А., Соломатин Е. О., Салтыков И. П., Кочкин Н. А.* Решение задач строительной акустики как фактора, обеспечивающего безопасность и комфортность проживания в зданиях // *Жилищное строительство*. 2014. № 10. С. 48–49.
2. *Мурзакова А. Р., Шаяхметов У. Ш., Васин К. А., Бакунов В. С.* Разработка технологии получения эффективного строительного пористого тепло- и звукоизоляционного конструкционного материала // *Строительные материалы*. 2011. № 5. С. 65–66.
3. *Антонов А. И., Бацунова А. В., Крышов С. И.* Оценка шума в помещениях с источниками импульсного звука периодического действия // *Вестник МГСУ*. 2011. Т. 1. № 3. С. 48–53.
4. *Хританков В. Ф.* Легкие органоминеральные бетоны с повышенной звукопоглощающей способностью // *Строительные материалы*. 2009. № 8. С. 60–63.

## **Секция «Теплогазоснабжение и вентиляция»**

УДК 697.148

*Кирилл Алексеевич Иванкин,*  
аспирант

*Татьяна Васильевна Щукина,*

канд. техн. наук, доцент

*Илья Сергеевич Курасов,*

ст. преподаватель

(Воронежский государственный  
технический университет)

*E-mail: kirilivankin@yandex.ru,*

*ilya.kurasov@yandex.ru*

*Kirill Alekseevich Ivankin,*  
postgraduate student

*Tatyana Vasilevna Shchukina,*

PhD in Sci. Tech., Associate Professor

*Ilya Sergeevich Kurasov,*

senior lecturer

(Voronezh State

Technical University)

*E-mail: kirilivankin@yandex.ru,*

*ilya.kurasov@yandex.ru*

### **К ВОПРОСУ ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СВЕТОПРОЗРАЧНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕПЛИЦ**

#### **ON THE ISSUE OF MATERIALS FOR TRANSLUCENT ENCLOSING STRUCTURES OF INDUSTRIAL GREENHOUSES**

Рассматриваются характеристики различных материалов, применяемых в качестве наружных светопрозрачных ограждений. Наряду с широко распространенными рекомендуется к использованию для обустройства телиц фибролайт, относящийся по своей структуре к стеклопластикам. Учитывая его уникальные свойства, а так же достаточно высокую стоимость по отношению к другим пропускающим солнечное излучение материалам, предлагается комбинированное применение в совокупности со стеклом или поликарбонатом. Так же для повышения энергоэффективности сооружений данного назначения целесообразно выполнять внешние каркасы с поликарбонатом в качестве наружного ограждения и организовывать внутренние облегченные конструкции с полиэтиленовым покрытием высокой светопропускной способности.

*Ключевые слова:* теплицы, парники, наружные ограждения, светопрозрачные материалы, свойства, конструкции.

The characteristics of various materials used as exterior translucent fences are considered. Along with the widespread ones, fibrolite, which is structurally related to fiberglass, is recommended for the construction of heifers. Given its unique prop-

erties, as well as its relatively high cost in relation to other solar-permeable materials, a combined application in combination with glass or polycarbonate is proposed. Also, to increase the energy efficiency of structures for this purpose, it is advisable to make external polycarbonate frames as an external fence and organize internal light-weight structures with a polyethylene coating of high light transmission capacity.

*Keywords:* greenhouses, greenhouses, external fences, translucent materials, properties, structures.

Стратегия развития агропромышленного комплекса [1] предполагает повышение уровня продовольственной безопасности посредством вовлечения в оборот новых земель и увеличения объемов продукции. В связи с этим ежегодно возрастает количество сооружений сельскохозяйственного назначения, и, в частности, тепличных комплексов, предназначенных как для сезонного, так и для круглогодичного выращивания овощей, цветов и рассады.

Поддержание комфортных условий для вегетации требует, чтобы наружные конструкции, наряду с энергоэффективной эксплуатацией, обеспечивали максимальное проникновение прямого и рассеянного света, равномерную температуру без значительных амплитуд в ее изменениях, необходимый воздухообмен при регулировании тепло-влажностных режимов и возможность автоматизации производственных процессов.

Условия эксплуатации теплиц, как правило, определяют возможные варианты исполнения наружных ограждений. Так, например, при осуществлении круглогодичного процесса выращивания следует проектировать трансформирующиеся конструкции из стекла или из светопрозрачных полимерных материалов [2]. Ограждения весенних однопролетных теплиц для индивидуальных хозяйств также выполняются из стекла или прозрачного полимера, но достаточно часто из пленки при выполнении двухслойного или однослойного укрытия с дополнительными передвижными шторами или теплозащитными экранами. Для сооружений сезонной эксплуатации, вне зависимости от масштабов производства, применение пленок позволяет освобождать каркасы от полимерного материала, как на зимние, так и на летние месяцы [2], в последнем случае часто для дальнейшего развития культуры в естественной среде произрастания.

Из перечисленных светопрозрачных ограждений наиболее простым и дешевым вариантом для обустройства теплиц безусловно

являются полимерные пленки [3]. Свойства таких материалов должны обеспечивать беспрепятственное проникновение излучения, тепловую защиту, гидрофильность, атмосферостойкость и низкие показатели потери прочности при длительном воздействии солнечной радиации.

Укрывные пленки теплиц, предназначенных для выращивания рассады овощных культур в открытом грунте, должны пропускать не менее 70 % ультрафиолетового диапазона Б (290-330 нм) [2]. К таким видам материалов относятся полиэтилен, поливинилхлорид и этилентетрафторэтилен (табл. 1, 2) [4, 5]. Если светопрозрачные ограждения открываются более чем на 70 % от общей площади, то это требование не предъявляется [2].

Во избежание механических повреждений пленочных ограждений конструкции каркаса следует проектировать криволинейного очертания с плотным прилеганием укрывного материала при его установке с необходимым натяжением [2].

Ограниченный срок использования широко распространенных светопрозрачных пленочных покрытий дает основание рекомендовать к применению в качестве наружного ограждения этилентетрафторэтилен. ETFE [6] или, как еще его называют, «тефлоновая пленка» относится к полимерным пленочным материалам и имеет в своем составе фтор, обладает высокими противокоррозионными свойствами и прочностью в широком диапазоне температур (табл. 2) [2, 7, 8].

Несмотря на то, что поливинилхлорид и этилентетрафторэтилен по своим свойствам не уступают полиэтилену, а даже превосходят по нескольким позициям, наибольшее распространение, в том числе и по причине ценообразования, получил материал, последний из перечисленных [6].

Таблица 1

**Типы пленок, наиболее широко применяемые  
для наружных светопрозрачных ограждений теплиц**

Режимы эксплуатации теплиц	Наименование пленки	ГОСТ, ТУ, марка	Область применения	Светопропускная способность, %
Круглогодичные	Полиэтиленовая стабилизированная, армированная полиэтиленом высокого давления	ТУ 6-19-17-78, марка А	Во всех районах	70
	Поливинилхлоридная	ГОСТ 16272-79*, марка С	В районах с температурой наиболее холодных суток не ниже минус 25 °С	90
Сезонные	Полиэтиленовая стабилизированная	ГОСТ 10354-82, марки СТ и СИК	Во всех районах для теплиц с ограждением, открывающимся более чем на 60 % общей его площади	70
	Поливинилхлоридная	ГОСТ 16272-79*, марка С	В теплицах с ограждением, открывающимся более чем на 60 % общей его площади, в районах с температурой наиболее холодных суток не ниже минус 25 °С	90

Таблица 2

## Характеристики рекомендуемых светопрозрачных материалов для наружных ограждений теплиц

Наименование эксплуатационных характеристик	Наименование светопрозрачного материала					
	Полиэтилен	Полипропилен листовой прозрачный	Этиленгтетрафторэтилен	Фибролайт	Закаленное стекло	
Вес, кг/м <sup>2</sup>	0,19	2,8–36,6	0,15–0,35	1,4–1,6	10	
Толщина/количество слоев, мм (мкм)/шт.	180/3	3–40/1	0,7–0,8/1	1–2/1	4–6/1	
Светопропускание, %	87	88	95	85–92	89–92	
Плотность, кг/м <sup>3</sup>	925–970	900–910	1730–1850	1300–1600	2500	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	0,36–0,43	0,16–0,22	0,23	0,20–0,23	0,72–1,15	
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	1550	1930	900	840–1150	720	
Коэффициент линейного расширения, мм/(м·°С)	0,062	4·10 <sup>-3</sup>	4·10 <sup>-5</sup>	8·10 <sup>-5</sup>	9·10 <sup>-6</sup>	
Предел прочности на растяжение, МПа	30–38	24,5–39	42	1800	7,5	
Рабочий диапазон температур, °С	от –80 до +60	от –40 до +110	от –185 до +150	от –50 до +50	от –70 до +250	

Все более широкую популярность для возведения теплиц различного уровня масштабирования приобретает сотовый поликарбонат [11]. Его применение повышает не только теплозащитные свойства наружных ограждений (табл. 3) [9], но и обеспечивает более продолжительный срок эксплуатации. Последнее достигается, в том числе, соблюдением требуемых условий монтажа: листы необходимо располагать поверхностью с УФ-защитой на внешнюю сторону; изгибать для арочных конструкций следует поперек ребер жесткости; при вертикальном остеклении ребра жесткости должны быть расположены вертикально.

Таблица 3

**Характеристики, рекомендуемых панелей  
из сотового поликарбоната для ограждений теплиц**

Наименование эксплуатационных характеристик	Толщина панелей, мм				
	4	6	8	10	16
Вес, кг/м <sup>2</sup>	0,8–1	1,3	1,5–1,7	1,7–2	2–2,7
Количество слоев, шт.	2	2	2	2	3
Светопропускание, %	86	86	84	84	73
Минимальный радиус изгиба, м	0,7	1,05	1,4	1,75	2,8
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м <sup>2</sup> ·°С)	0,2				
Удельная теплоемкость, Дж/(кг·°С)	1170				
Коэффициент линейного расширения, мм/(м·°С)	6,5·10 <sup>-5</sup>				
Предел прочности на растяжение, МПа	60				
Рабочий диапазон температур, °С	от –40 до +120				

Одним из перспективных материалов для промышленных теплиц является фибролайт [12] – бесцветный стеклопластик, прозрачность

которого обеспечивает естественное солнечное освещение помещений. Такое покрытие обладает высокой прочностью, пластичностью, устойчивостью к воздействию факторов агрессивной внешней среды, в том числе и к ультрафиолетовому диапазону излучения, низкой теплопроводностью, а также малым удельным весом (табл. 2) [13]. Материал может быть использован для создания каркасных конструкций промышленных теплиц и парников, а также для сооружений другого назначения [14].

Так как фибролайт значительно легче традиционных покрытий, таких как стекло или поликарбонат, то его применение сокращает не только затраты на транспортировку и монтаж, но и снижает нагрузку на несущие конструкции.

При вышеперечисленных преимуществах фибролайт, в отличие от стекла, в процессе длительной эксплуатации может изменить свою прозрачность, тем самым уменьшив естественную освещенность. Также следует отметить, что в экономической составляющей он дороже широко распространенных материалов, пропускающих солнечное излучение. Поэтому наиболее целесообразным вариантом использования стеклопластика является его сочетание с другими прозрачными структурами, такими как стекло или поликарбонат, для создания комбинированных конструкций теплиц. Это позволит улучшить светопропускные характеристики наружных ограждений и повысить энергоэффективность сооружений.

Несмотря на широкий выбор полимерных материалов, стекло с учетом его долгосрочной эксплуатации часто используется для устройства теплиц. В соответствии с требованиями [2], для минимальной реакции конструкций ограждения на изменение температуры следует использовать закаленное стекло (табл. 2) [10]. Однако термическое сопротивление закаленного стекла толщиной 6 мм значительно меньше, чем для сотового поликарбоната такой же толщины. Следовательно, с точки зрения энергоэффективности эксплуатации сооружений светопрозрачные ограждения из сотового поликарбоната предпочтительнее.

Увеличение толщины данного полимера снижает теплопотери в окружающую среду, но при этом не всегда удается достичь высокой степени уплотнения стыковых швов, которые в процессе эксплу-

атации будут образовывать мостики холода. Поэтому в качестве эффективного решения для наружных ограждений можно использовать внешний каркас из поликарбоната толщиной не более 6 мм и внутренние облегченные конструкции с полиэтиленовой пленкой, обладающей высокой светопропускной способностью (табл. 2).

Образованная воздушная прослойка между двумя разными по структуре полимерами является дополнительным термическим сопротивлением, что обеспечивает снижение потребления требуемых ресурсов для обеспечения параметров микроклимата в зимний сезон. Для весенних и осенних периодов можно предусмотреть механический сбор пленки в верхней части внутреннего каркаса. Последнее положение материала будет выполнять защитную функцию для растений от солнечных ожогов при интенсивной солнечной радиации, и в этом случае для летнего сезона не потребуются дополнительные мероприятия, предотвращающие перегрев воздуха в рабочей зоне.

#### Литература

1. Стратегия развития агропромышленного и рыбохозяйственного комплексов Российской Федерации на период до 2030 год. Распоряжение № 2567-р Правительства РФ от 8 сентября 2022 г., 2022. 47 с. URL: <http://static.government.ru/media/files/G3hzRyrGPbmFAfBFgmEhxTrec694MaHp.pdf> (дата обращения: 14.02.2025).
2. СП 107.13330.2012. Теплицы и парники. Актуализированная редакция СНиП 2.10.04-85. М. : Минрегион России, 2012. 23 с.
3. Пленки полимерные. Большая российская энциклопедия 2004-2017. URL: <https://old.bigenc.ru/chemistry/text/3145034?ysclid=m7xvxxfyea17675621> (дата обращения: 24.02.2025).
4. ГОСТ 10354-82. Пленка полиэтиленовая. Технические условия. Актуализированная редакция. 2007. 14 с.
5. Аяском. Нетканые материалы для всех сфер жизнедеятельности. URL: <https://ayaskom.ru/articles/kak-vybrat-plenku-dlya-teplitsy/> (дата обращения: 24.02.2025).
6. Неделя науки СПбПУ. Материалы научной конференции с международным участием, инженерно-строительный институт. 2019. Филиппова А. С. Современные светопрозрачные конструкции с использованием инновационного материала – мембраны ETFE. 207–209 с.
7. ГОСТ 26996-86. Полипропилен и сополимеры полипропилена. Технические условия. 2015. 7 с.

8. Завод тормозных, уплотнительных и теплоизоляционных изделий. Характеристики листового полипропилена. URL: <https://zavodati.ru/katalog/konstrukcionnye-materialy/polipropilenovuj-list/> (дата обращения: 01.03.2025).
9. Химсырье. Листовые пластики и пленки. URL: <https://www.hims.ru/sotoviy-polikarbonat-tech/> (дата обращения: 24.02.2025).
10. ГОСТ 111-2001. Стекло листовое. Технические условия. Актуализированная редакция. 2015. 8 с.
11. Инженерные системы и сооружения. 2019. Семенова Э. Е., Горшкова Р. Е. Эффективность применения светопрозрачных конструкций промышленных теплиц на этапе проектирования. 14–19 с.
12. Меркушев Р. М. Перспективы применения светопрозрачных конструкций из полимерных композиционных материалов. XXV Туполевские чтения. 2021. 487–490 с.
13. Листовой стеклопластик на промышленных и частных объектах. Фибролайт. URL: <https://tk-sintez.ru/fibrolait/?ysclid=m7s3oiv3cp88818114> (дата обращения: 01.03.2025).
14. Светопрозрачные и другие конструкции из стеклопластика URL: <https://remontantenn.ru/wall/stekloplastikovyh-konstrukcii-svetoprozrachnye-i-drugie-konstrukcii-iz/> (дата обращения: 24.02.2025).

УДК 697.148

*Василий Дмитриевич Громов,*  
студент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*E-mail: mrr.gromov091@yandex.ru*

*Vasily Dmitrievich Gromov,*  
student  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*E-mail: mrr.gromov091@yandex.ru*

## **РАСЧЕТ ВОЗДУХОРАСПРЕДЕЛЕНИЯ КОНФЕРЕНЦ-ЗАЛА: ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ НОРМАТИВНОГО МЕТОДА НА ОСНОВЕ CFD-МОДЕЛИРОВАНИЯ**

### **AIR DISTRIBUTION CALCULATION IN A CONFERENCE HALL: ACCURACY ASSESSMENT OF DESIGN METHODS USING CFD MODELING**

Статья посвящена анализу ограничений нормативного метода проектирования систем воздухораспределения в конференц-залах с использованием потолочных фанкойлов. На основе сравнения с CFD-моделированием выявлены ключевые проблемы стандартного подхода, связанные с игнорированием взаимодействия воздушных струй и не симметричного расположения. Предложено усложнение методики расчета за счет разделения алгоритма на этапы и учета слияния струй. Результаты подчеркивают необходимость адаптации нормативных методов для повышения точности прогнозирования микроклимата в условиях сложных конфигураций.

*Ключевые слова:* воздухораспределение, конференц-зал, CFD-моделирование, потолочные фанкойлы, кондиционирование.

The article focuses on analyzing the limitations of the normative design method for air distribution systems in conference halls using ceiling fan coils. A comparison with CFD modeling revealed key shortcomings of the standard approach, primarily due to the neglect of air jet interactions and asymmetric equipment placement. Methodological enhancements are proposed, including a multi-stage calculation algorithm and consideration of jet merging effects. The results emphasize the need to adapt normative methods to improve the accuracy of microclimate prediction in complex system configurations.

*Keywords:* air distribution, conference hall, CFD modeling, ceiling fan coils, air conditioning.

## Введение

Современные общественные пространства, такие как конференц-залы, предъявляют повышенные требования к системам вентиляции и кондиционирования. Эти помещения характеризуются значительной плотностью размещения людей, динамичной тепловой нагрузкой и необходимостью обеспечения равномерного микроклимата. Особую сложность представляет проектирование систем с несимметричным расположением воздухораспределителей и интеграцией потолочных фанкойлов, что повышает риски возникновения локальных зон дискомфорта из-за взаимного влияния разнонаправленных воздушных струй и тепловых потоков. В таких условиях актуальным становится поиск методики проектирования, сочетающей точность прогноза, скорость расчетов и соответствие нормативным требованиям.

В российской практике доминирует нормативный подход, регламентированный [1], основанный на упрощенных формулах с использованием кинематических и скоростных коэффициентов для оценки затухания струй. Однако ключевым ограничением метода является отсутствие стандартизированных коэффициентов для фанкойлов – их параметры либо экстраполируются из данных для вентиляционных диффузоров, либо не учитываются вовсе, что приводит к некорректному прогнозированию зон комфорта. Кроме того, методика изначально разработана для симметричных схем воздухораспределения, а ее применение к несимметричным конфигурациям требует недоказанных допущений о аддитивности воздействия струй.

Альтернативой выступает CFD-моделирование (Computational Fluid Dynamics), позволяющее анализировать распределение воздуха для систем любой геометрической сложности, включая гибридные решения с фанкойлами. Такой подход давно используют как и в науке так и при проектировании [2–4]. Несмотря на преимущества в точности, метод остается ресурсоемким: подготовка 3D-модели, настройка граничных условий и верификация результатов требуют значительных временных затрат, что ограничивает его применение в типовом проектировании.

В данной статье исследуется возможность использования нормативного метода к системам с потолочными фанкойлами. На основе

сравнения с CFD-моделированием оцениваются погрешности расчета скорости воздуха и температуры в зоне присутствия людей, а также предлагаются модифицированные коэффициенты для учета взаимодействия струй и теплового воздействия фанкойлов.

### Методы

Для адаптации метода к системе с несимметричным расположением диффузоров и потолочными фанкойлами коэффициенты затухания струй  $m$  и  $n$  выбраны по аналогии с четырехсторонними диффузорами (4-АПН), учитывая схожесть схемы подачи воздуха. Дополнительно проведены расчеты для базового случая ( $m = 1$ ,  $n = 1$ ) с изотермическими условиями. Исходные данные для расчета приведены в табл. 1.

Таблица 1

#### Исходные данные для расчета воздухораспределения

№	$F_{o.з.}$ , м <sup>2</sup>	$\Delta t_{o.з.}$ , °С	$h$ , м	$h_{o.з.}$ , м	$T$ , К	$F_{o.з.}$ , м <sup>2</sup>	$v_{o.з.}$ , м/с	$m$	$n$	Примечания
1	20,7	7	3	1,5	298	0,05	3,95	2,2	1,6	Для фанкойлов у остекления
1.1								1	1	При $m$ и $n = 1$
2	24,9							2,2	1,6	Для фанкойлов в глубине помещения
2.1								1	1	При $m$ и $n = 1$

Численный анализ выполнен в SolidWorks Flow Simulation с использованием модели турбулентности  $k$ - $\epsilon$ , что обеспечило высокую точность результатов, так как программа широко применяется для задач моделирования воздухораспределения [5, 6]. Для формирования сетки использовано локальное уплотнение в зонах струйных течений; общее число ячеек составило 1,2 млн. В качестве граничных условий задан расход на диффузорах и фанкойлах, рассчитанный для

ассимиляции явных теплоизбытков. Учтены тепловыделения от людей, оборудования, искусственного освещения и солнечной радиации.

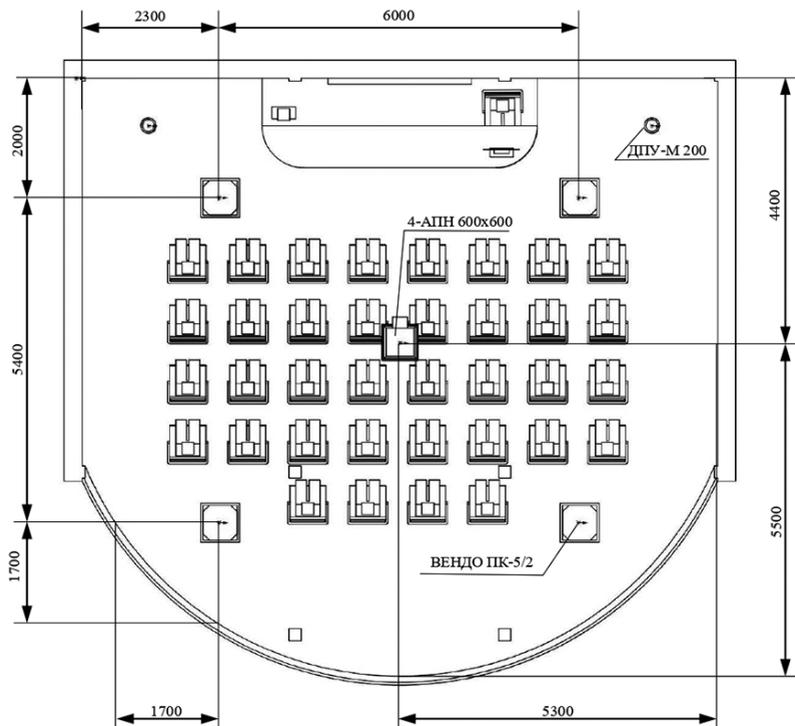


Рис. 1. Схема установки ВРУ

Для оценки точности нормативного метода выполнено сравнение с результатами CFD-моделирования. Контрольные параметры (температура и скорость воздуха) измерены на высоте 1,5 м.

На рис. 1 подробно показана схема установки фанкойлов и диффузоров.

### Результаты и обсуждение

Визуализация CFD-моделирования (рис. 2 и 3) демонстрирует формирование локальных зон дискомфорта, обусловленных взаимо-

действием воздушных струй от фанкойлов и диффузоров. В отличие от CFD-подхода, нормативная методика предоставляет осредненные значения параметров на входе в рабочую зону, что не позволяет учесть ключевые факторы: эффекты слияния струй, асимметричное расположение диффузоров относительно стен, конвективные струи от тепловых выделений.

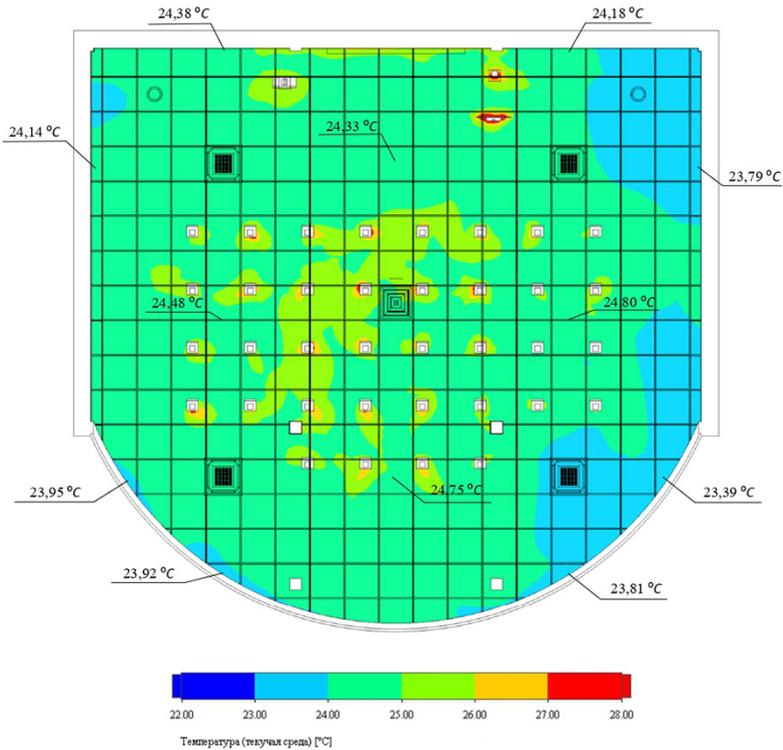


Рис. 2. Значения температуры воздуха в сечении рабочей зоны

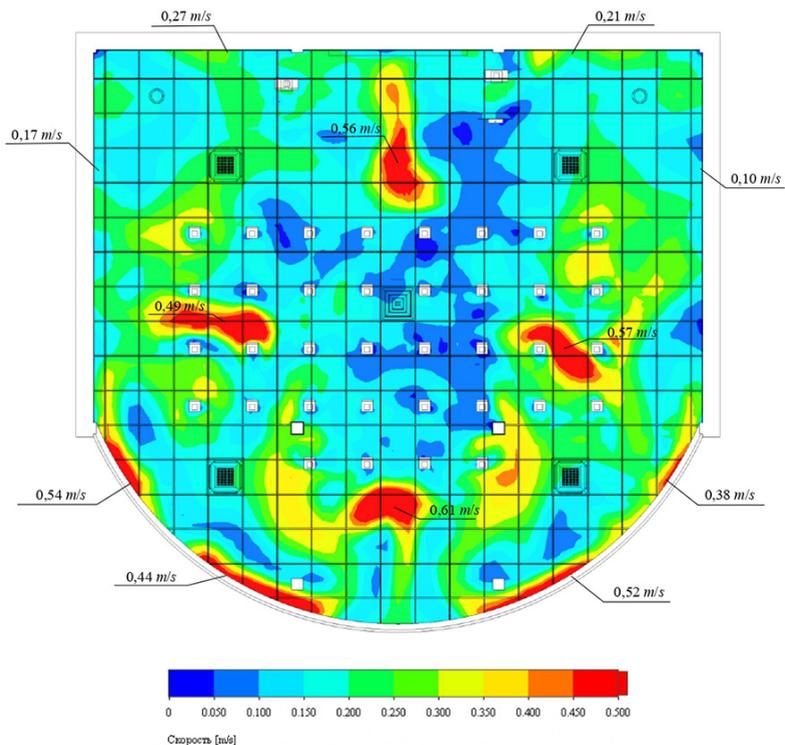


Рис. 3. Значения скорости воздуха в сечении рабочей зоны

Полученные значения по методике и по моделированию заносятся в итоговую табл. 2.

Таблица 2

## Итоговая таблица результатов

№	x, м	H, м	$\Delta t_x, ^\circ\text{C}$	$v_x, \text{м/с}$	$t_x, ^\circ\text{C}$	$v_{cp}, ^\circ\text{C}$	$(v_{cp} \cdot v_x) \cdot 100\% / v_{cp}, \%$	$t_{cp}, ^\circ\text{C}$	$(t_{cp} - t_x) \cdot 100\% / t_{cp}, \%$
1	3,77	3,34	0,83	0,09	24,17	0,51	82,3	24,16	-0,04
1.1	3,77	2,85	0,52	0,04	24,48		92,2		-1,32
2	3,99	3,34	0,78	0,09	24,22	0,34	73,5	24,30	0,33
2.1	3,99	2,85	0,49	0,04	24,51		88,2		-0,86

Погрешность расчета температур не превысила 1,32 %, что подтверждает достаточную точность методики в этой части. Однако для скоростей воздуха отклонения между нормативным методом и CFD-данными составили от 73,5 % до 92,2 % (табл. 2). Такой значительный разброс свидетельствует о неприменимости стандартного подхода для оценки воздухораспределения в системах с фанкойлами, особенно в несимметричных схемах, где струи взаимодействуют. Несмотря на меньшие временные и ресурсные затраты, методика требует модификации для сложных конфигураций. Например, при слиянии струй (как в симметричной схеме из исследования) необходимо разделить расчет на отдельные участки: кратчайший путь струи по строительным конструкциям, встречное взаимодействие струй по наикратчайшему расстоянию.

В текущей методике предполагается, что струя замедляется только при контакте с потолком и стенами. Однако в реальности при слиянии струи сначала теряют скорость за счет взаимного воздействия, а затем – за счет трения о воздух. Это приводит к завышению скоростей в зонах пересечения потоков, что подтверждается данными CFD-моделирования.

Также для повышения точности нормативного метода необходимо проведение специализированных исследований, направленных на определение кинематических ( $m$ ) и температурных ( $n$ ) коэффициентов, характерных именно для фанкойлов.

### **Заключение**

Проведенное исследование выявило существенные ограничения нормативного метода при проектировании систем воздухораспределения с потолочными фанкойлами, особенно в несимметричных конфигурациях. Основная проблема заключается в некорректном учете взаимодействия воздушных струй, асимметричного расположения оборудования и конвективных потоков от тепловых источников. Сравнение с CFD-моделированием показало, что погрешности расчета скоростей воздуха достигают 92,2 %, что делает стандартный подход неприменимым для сложных схем.

CFD-анализ подтвердил свою эффективность в прогнозировании локальных зон дискомфорта, однако его ресурсоемкость ограничивает

использование в типовом проектировании. Для решения этой проблемы предложены модификации нормативного метода, включающие двухэтапный расчет торможения струй и разработку специализированных коэффициентов  $m$  и  $n$  для фанкойлов. Эти изменения позволят снизить погрешности, сохранив преимущества метода – скорость и доступность.

### Литература

1. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003 (утв. и введен в действие Приказом Минстроя России от 30.12.2020 N 921/пр).
2. Денисихина Д. М. Особенности численного моделирования поведения воздушных потоков в объемах концертных и театральных залов // Вестник евразийской науки. 2014. № 3(22).
3. Денисихина Д. М. Расчет коэффициента воздухообмена методами математического моделирования параметров микроклимата // Известия КазГАСУ. 2023. № 4(66).
4. Muhieldeen M. W., Kuang Y. C. Saving energy costs by combining air-conditioning and air-circulation using CFD to achieve thermal comfort in the building // Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences. – 2019. – Т. 58. – №. 1. – С. 84–99.
5. Caskey S. et al. Computational fluid dynamics simulations to assess spatial variability and optimal ventilation scenarios for biological laboratory exposures // Applied Biosafety. – 2023. – Т. 28. – №. 4. – С. 256–264.
6. Ali A. M. et al. Computational fluid dynamic (CFD) of Air conditioning system for human thermal comfort analysis: a simulation study // 2018 8th IEEE International Conference on Control System, Computing and Engineering (ICCSCE). – IEEE, 2018. – С. 93–98.

УДК 697.148

*Василий Дмитриевич Громов,*  
студент  
(Санкт-Петербургский государственный  
архитектурно-строительный университет)  
*E-mail: mrr.gromov091@yandex.ru*

*Vasily Dmitrievich Gromov,*  
student  
(Saint Petersburg State University  
of Architecture and Civil Engineering)  
*E-mail: mrr.gromov091@yandex.ru*

## **ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТЬ ВЕНТИЛЯЦИОННЫХ СИСТЕМ: СРАВНИТЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ВХОДНОЙ КОРОБКИ ВЕНТИЛЯТОРА**

### **ENERGY EFFICIENCY OF VENTILATION SYSTEMS: A COMPARATIVE STUDY OF DIFFERENT FAN INLET BOX DESIGNS**

Проведено CFD-моделирование пяти конструкций входных коробок радиальных вентиляторов для снижения аэродинамических потерь. Установлено, что применение двусоставного диффузора, а также скруглений в верхней части коробки уменьшает коэффициент местных сопротивлений (КМС) на 8,6 % по сравнению с базовым вариантом. Результаты демонстрируют, что оптимизация геометрии входной коробки обеспечивает значимое снижение потерь, однако дальнейшее улучшение параметров исключительно за счет изменения геометрических характеристик имеет ограниченный потенциал (10–15 %).

*Ключевые слова:* вентилятор, входная коробка, энергоэффективность, CFD-анализ, аэродинамические потери.

CFD modeling was performed for five designs of radial fan inlet boxes to reduce aerodynamic losses. The study revealed that using a two-part diffuser and rounded edges at the top of the box reduces the local resistance coefficient (LRC) by 8.6 % compared to the baseline design. The results demonstrate that optimizing the inlet box geometry provides a significant reduction in losses; however, further improvement of parameters solely through geometric modifications has limited potential (10–15 %).

*Keywords:* fan, inlet box, energy efficiency, CFD analysis, aerodynamic losses.

#### **Введение**

Повышение энергоэффективности вентиляционных систем – актуальная задача в условиях роста требований к энергосбережению.

Вентиляторы, как ключевой элемент систем, потребляют до 30 % электроэнергии в промышленных зданиях. Одним из факторов, влияющих на их эффективность, является конструкция входной коробки, которая обеспечивает равномерность потока перед рабочим колесом.

Современные исследования показывают, что геометрические параметры коробки (радиусы скруглений, форма выходного патрубка) напрямую связаны с аэродинамическими потерями [1]. Однако большинство работ ограничиваются базовыми конфигурациями, а применение CFD-моделирования для анализа редко встречается. Цель исследования – сравнительный анализ пяти конструкций входных коробок с использованием SolidWorks Flow Simulation для минимизации КМС.

### **Методы**

Исследование выполнено методом вычислительной гидродинамики (CFD) в программе SolidWorks Flow Simulation с моделью турбулентности  $k-\varepsilon$ . Проанализированы пять конструкций входных коробок (рис. 1), включая базовую (схема 1), представленную в [2], рыночный аналог (схема 2) [3], модификации с диффузорами и скруглениями (схемы 3–5).

В качестве граничных условий были приняты следующие значения: начальная скорость потока – 14 м/с, давление на выходе – атмосферное, условие прилипания на стенках.

Расчетная сетка содержала от 2,2 до 5,6 млн ячеек.

Основные параметры анализа: распределение скоростей, зоны рециркуляции, КМС.

В табл. 1 приведены геометрические параметры для каждой из рассматриваемых схем.

Таблица 1

Геометрические параметры входных коробок

Схема	Размеры											$\gamma, ^\circ$	$\varphi, ^\circ$	
	$D, \text{мм}$	$A, \text{мм}$	$B, \text{мм}$	$c, \text{мм}$	$E(E_1, E_2), \text{мм}$	$L, \text{мм}$	$l_1, \text{мм}$	$h, \text{мм}$	$R, \text{мм}$	$r, \text{мм}$	$\alpha_s, ^\circ$			$\beta, ^\circ$
1	500	400	700	30	75	678	—	179	325	75	160	—	—	—
2	500	400	700	30	100	460	235	46	—	—	160	129	45	—
3	500	400	700	30	100	460	235	46	—	100	160	—	45	—
4	500	400	700	30	100	460	—	46	350	—	160	129	—	—
5	500	400	700	30	25	460	235	46	—	—	160	153	—	152

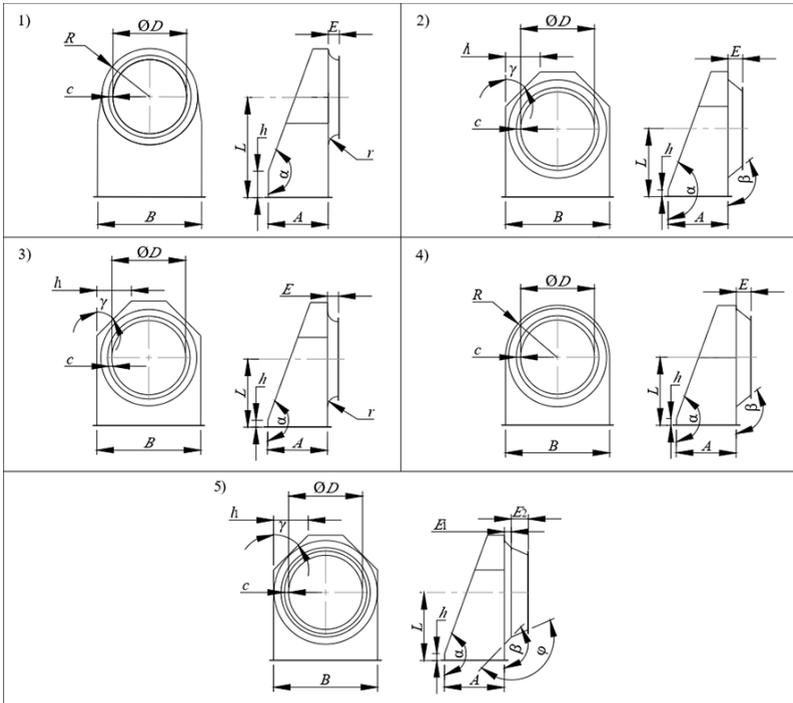


Рис. 1. Схемы входных коробок для радиальных вентиляторов

### Результаты и обсуждение

Проведенный сравнительный анализ пяти конструкций входных коробок радиального вентилятора показал, что модификация геометрии оказывает не значительное влияние на аэродинамические потери с точки зрения входной коробки как элемента сети воздуховодов. Базовая конструкция (схема 1) продемонстрировала наибольшие потери давления, что связано с наличием скругления выходного патрубка по малому радиусу, что заставляет отклоняться поток под большим углом к горизонту.

Замена скругления на диффузор в выходном патрубке (схема 2) позволила сократить зоны отрыва потока и снизить коэффициент местных сопротивлений (КМС) на 5,1 %. Однако в верхней части

коробки наблюдалось усиление рециркуляции, что указывает на необходимость дальнейшей оптимизации. Увеличение радиуса скругления (схема 3) частично стабилизировало поток, но не устранило ключевые проблемы, такие как формирование вихрей и разброс скоростей.

Наилучшие результаты достигнуты в схемах 4 и 5. Применение скругления в верхней части коробки (схема 4) сократило рециркуляционные зоны и снизило КМС на 7,5 % относительно базового варианта. Интеграция двусоставного диффузора с углами раскрытия  $\beta = 153^\circ$  и  $\varphi = 152^\circ$  (схема 5) обеспечила минимальные потери ( $\xi = 0,647$ ) за счет плавного распределения потока и уменьшения турбулентности. Это решение также способствовало формированию более равномерного поля скоростей на выходе, что критически важно для снижения нагрузки на рабочее колесо вентилятора.

Во всех проанализированных конструкциях в области выхода потока из входной коробки сохранялось смещение максимальных скоростей в нижней части. Однако модифицированные варианты (схемы 3–5) уменьшили разброс между верхней и нижней зонами (рис. 2).

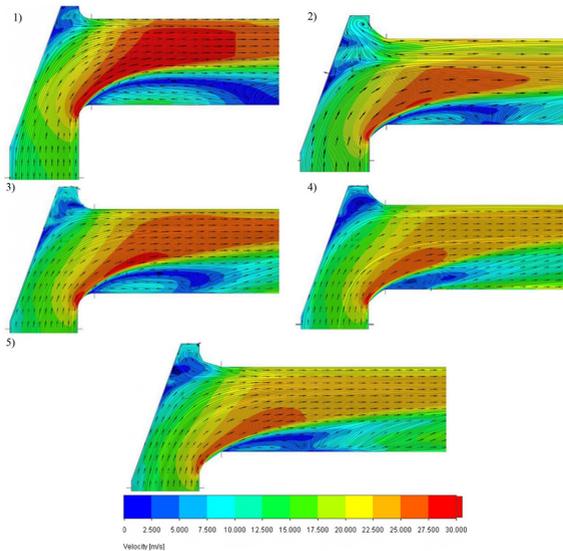


Рис. 2. Продольные профили скоростей входных коробок

Для наглядного представления полученных результатов, значения заносятся в табл. 2.

Таблица 2

Сводная таблица результатов

Схема	$P_1$ , Па	$P_2$ , Па	$v_1$ , м/с	$v_2$ , м/с	$\xi$
1	101572,9	101330,2	14,14	23,65	0,708
2	101550,4	101338,5	14,34	22,68	0,672
3	101543,8	101333,6	14,33	22,78	0,661
4	101538,8	101341,4	14,40	22,18	0,655
5	101530,5	101336,4	14,41	22,14	0,647

### Заключение

Проведенное исследование демонстрирует, что модификация геометрических параметров входной коробки радиального вентилятора (включая применение двусоставного диффузора и скруглений) позволяет снизить коэффициент местных сопротивлений (КМС) на 8,6 %. Однако дальнейшая оптимизация исключительно за счет изменения геометрии имеет ограниченную эффективность, с максимальным потенциалом улучшений в диапазоне 10–15 %.

Для преодоления указанных ограничений целесообразно рассмотреть интеграцию направляющих лопаток внутрь входной коробки. Подобные решение, как показано в работах [4, 5], не только снизит КМС, но и обеспечит равномерное распределение потока перед рабочим колесом, минимизируя дополнительные потери, не учтенные в рамках данного исследования.

### Литература

1. Соломахова Т. С. Об эффективной работе вентиляторов в системах вентиляции // АВОК. 2007. № 2. С. 32–39. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=3540](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=3540) (дата обращения: 19.02.2025).
2. Рекомендации по расчету гидравлических сопротивлений сложных элементов систем вентиляции. – М. : Стройиздат, 1981. – 32 с.

3. VETNZ. Входная коробка вентилятора ВКВО: техническое описание [Электронный ресурс]. URL: <https://tdventz.ru/product/vkvo/> (дата обращения: 19.02.2025).

4. *Juraeva M.* et al. Effect of guide vanes on recovering uniform flow in a ventilation duct in an existing twin-track subway tunnel //Journal of Mechanical Science and Technology. – 2015. – Т. 29. – С. 251–258. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12206-014-1231-y> (дата обращения: 19.02.2025).

5. *Hurtado J. P.* et al. Optimization study of guide vanes for the intake fan-duct connection using CFD //Processes. – 2021. – Т. 9. – №. 9. – С. 1555. URL: <https://www.mdpi.com/2227-9717/9/9/1555> (дата обращения: 19.02.2025).

6. *Wang H.* et al. Simulation and experimental study on the elbow pressure loss of large air duct with different internal guide vanes //Building Services Engineering Research and Technology. – 2022. – Т. 43. – №. 6. – С. 725–739. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/full/10.1177/01436244221107058> (дата обращения: 19.02.2025).

**УДК 697.94**

*Полина Александровна Заплаткина,*  
студент

*Эльмира Усмановна Ямлеева,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Ульяновский государственный  
технический университет)

*E-mail: zaplatkinap@mail.ru,*  
*e.yamleeva@mail.ru*

*Polina Alexandrovna Zaplatkina,*  
student

*Elmira Usmanovna Yamleeva,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Ulyanovsk State  
Technical University)

*E-mail: zaplatkinap@mail.ru,*  
*e.yamleeva@mail.ru*

## **АНАЛИЗ ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ VRF-СИСТЕМ И «ЧИЛЛЕР-ФАНКОЙЛЫ»**

### **ENERGY EFFICIENCY ANALYSIS OF VRF SYSTEMS AND “CHILLER-FAN COILS”**

В статье приводится анализ энергоэффективности VRF-систем и «Чиллер-фанкойлы». Анализ проводился по энергопотреблению систем «Чиллер On-OFF», «Чиллер DC-инвертор», VRF 2004 года и VRF 2022 года. Далее рассчитывается показатель энергетической эффективности EER, который более подробно показывает нужные нам параметры.

Данный анализ был произведен для того, чтобы понять какие системы более эффективны в настоящее время и какие будут обходиться дешевле в эксплуатации.

*Ключевые слова:* чиллер, фанкойл, VRF-система, теплоноситель.

The article provides an analysis of the energy efficiency of VRV systems and chiller fan coils. The analysis was carried out on the energy consumption of the “Chiller On-OFF”, “Chiller DC-inverter”, VRV 2004 and VRV 2022 systems. Next, the energy efficiency indicator EER is calculated, which shows in more detail the parameters we need.

This analysis was carried out in order to understand which systems are currently more efficient and which will be cheaper to operate.

*Keywords:* chiller, fan coil, VRV system, coolant.

В современных зданиях системы кондиционирования занимают лидирующие позиции среди потребителей электроэнергии, что делает проблему их энергоэффективности крайне важной. В данной

статье проводится сравнительный анализ двух типов систем – VRF-систем и систем «чиллер-фанкойл» с акцентом на их энергопотребление и эффективность работы.

Особенность чиллерных систем заключается в том, что холодная вода доставляется к фанкойлам посредством насосов, при этом в процессе транспортировки происходят тепловые потери. Для того чтобы обеспечить конечных потребителей 100 кВт холодопроизводительности, чиллер вынужден вырабатывать на 7 % больше – 107 кВт, поскольку эти дополнительные 7 % расходуются на компенсацию потерь при транспортировке [1].

VRF-системы работают на основе жидкого хладагента, который циркулирует в трубопроводах при температуре 25–30 °С. Важно отметить, что температура самих трубопроводов практически идентична температуре окружающей среды, что исключает тепловые потери через их стенки и обеспечивает эффективную транспортировку хладагента без снижения его охлаждающих свойств [2].

Рассмотрим таблицу 1, энергопотребление обычных чиллеров с ON-OFF компрессорами максимально. Хотя на максимальной производительности разница с инверторными компрессорами часто невелика, поскольку падение энергопотребления инверторов более заметно при частичной нагрузке.

В настоящее время VRF-системы демонстрируют значительно более высокий класс энергоэффективности по сравнению с оборудованием, выпущенным в 2004 году. Такой прогресс стал возможен благодаря внедрению DC-инверторных компрессоров и усовершенствованию конструкции холодильного контура.

Важно отметить, что современные VRF-системы потребляют на 20–35 % меньше электроэнергии в пиковые моменты по сравнению с аналогичными чиллерными установками. При этом ключевое значение имеет не столько прямая экономия на оплате электричества, сколько возможность обеспечить объект необходимой электрической мощностью. Существенным недостатком чиллерных систем часто становится их несоответствие требованиям доступной мощности для кондиционирования помещений.

Таблица 1

Система	«Чиллер-ON-OFF»	«Чиллер-DC-инвертор»	VRF 2004 года	VRF 2022 года
Фактическая производительность внутренних блоков	100 кВт	100кВт	100кВт	100кВт
Потери энталпии в трубопроводах	7 кВт	7 кВт	0 кВт	0 кВт
Фактическая производительность источников холода	107 кВт	107 кВт	100 кВт	100 кВт
Энергопотребление источников холода	35,39 кВт	31,5 кВт	32,2 кВт	25,0 кВт
Энергопотребление внутренних блоков	0,6 кВт	0,6 кВт	0,55 кВт	0,36 кВт
Энергопотребление насосов первой ступени (незамораживающие растворы)	3,49 кВт	3,49 кВт	0 кВт	0 кВт
Энергопотребление насосов второй ступени (вода)	3,12 кВт	3,12 кВт	0 кВт	0 кВт
<b>Итого энергопотребление</b>	<b>42,6 кВт</b>	<b>38,71 кВт</b>	<b>32,75 кВт</b>	<b>25,36 кВт</b>
<b>Итого ESEER</b>	<b>2,35</b>	<b>2,58</b>	<b>3,05</b>	<b>3,94</b>

Для полной оценки и приближенной к реальному энергопотреблению кондиционера были разработаны сезонные коэффициенты энергоэффективности SEER (Seasonal Energy Efficiency Ratio) и SCOP (Seasonal Coefficient of Performance).

Расчет обобщенных показателей производится с четырехступенчатым осреднением по стандартной формуле:

$$\begin{aligned} \text{Index} = & W1\text{EER} (A1 [\%], B1 [^{\circ}\text{C}]) + \\ & + W2\text{EER} (A2 [\%], B2 [^{\circ}\text{C}]) + W3\text{EER} (A3 [\%], B3 [^{\circ}\text{C}]) + \\ & + W4\text{EER} (A4 [\%], B4 [^{\circ}\text{C}]), \end{aligned} \quad (1)$$

где W1 – относительная длительность периода с загрузкой A [%] при температуре наружного воздуха или соответствующей температуре охлаждающей воды B [°C]. При этом сумма W1 + W2 + W3 + W4 всегда равна 1,0.

ESEER (European Seasonal Energy Efficiency Ratio) представляет собой показатель сезонной энергоэффективности, который определяется согласно регламентам Европейского Союза. Этот коэффициент регламентируется стандартами EECAC (Energy Efficiency and Certification of Central Air Conditioners), разработанными для оценки и сертификации энергоэффективности центральных систем кондиционирования воздуха. [3]

В Европе рекомендуется применять именно этот показатель, рассчитываемый по определенной формуле:

$$\begin{aligned} \text{ESEER} = & 0,03\text{EER} (100\%, 35^{\circ}\text{C}) + 0,33\text{EER} (75\%, 30^{\circ}\text{C}) + \\ & + 0,41\text{EER} (50\%, 25^{\circ}\text{C}) + 0,23\text{EER} (25\%, 20^{\circ}\text{C}). \end{aligned} \quad (2)$$

Рассмотрим, как были посчитаны эти показатели в таблице 1:

ESEER для VRF 2022

$$\text{ESEER} = 0,03 \cdot (100 / 25,36) + 0,33 \cdot (75 / 19,02) + 0,41 \cdot (50 / 12,68) + 0,23 \cdot (25 / 6,34) = 3,94$$

ESEER для VRF 2004:

$$\text{ESEER} = 0,03 \cdot (100 / 32,75) + 0,33 \cdot (75 / 24,56) + 0,41 \cdot (50 / 16,375) + 0,23 \cdot (25/8,19) = 3,05$$

ESEER для чиллера с DC-инвертором:

$$\text{ESEER} = 0,03 \cdot (100 / 38,71) + 0,33 \cdot (75 / 29,03) + 0,41 \cdot (50 / 19,36) + 0,23 \cdot (25 / 9,68) = 2,58$$

ESEER для чиллера с системой ON-OFF:

$$\text{ESEER Чиллер-IN-OFF} = 0,03 \cdot (100 / 42,6) + 0,33 \cdot (75 / 31,95) + 0,41 \cdot (50 / 21,3) + 0,23 \cdot (25 / 10,65) = 2,35$$

На основании этих расчетов построим график условной эффективности при снижении наружной температуры от +35 до +15 °С и загрузки системы от 100 до 50 % производительности (см. график).

Из анализа графика можно сделать следующие выводы:

- Холодильный коэффициент всех рассматриваемых систем возрастает при снижении как нагрузки, так и температуры наружного воздуха.

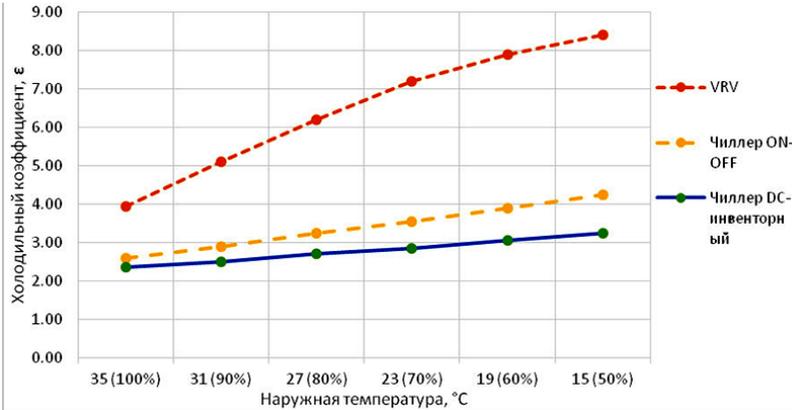
- VRF-системы демонстрируют значительно более высокий холодильный коэффициент и, как следствие, более низкое энергопотребление на всем диапазоне нагрузок и температур. Это достигается благодаря отсутствию в их конструкции насосов в холодильном контуре, теплообменников типа «фреон-вода» и «вода-гликоль», а также минимизации тепловых потерь.

- Режим работы систем охлаждения преимущественно приходится на нагрузку 60–80 %. В этих условиях VRF-системы расходуют в два раза меньше электроэнергии по сравнению с системами «чиллер-фанкойлы», что приводит к общему сезонному энергопотреблению примерно вдвое ниже, чем у чиллерных систем.

- Инверторные чиллеры, несмотря на свою экономичность по сравнению с моделями, оснащенными компрессорами ON-OFF, все же потребляют больше энергии, чем VRF-системы. Это объясняется сохранением конструктивных особенностей чиллерных систем, включая наличие гидравлического контура, который приводит к потерям при циркуляции холодоносителя и тепловым потерям через стенки трубопроводов.

Таким образом, VRF-системы демонстрируют лучшую энергоэффективность по сравнению с чиллерными аналогами.

**График условной эффективности при снижении наружной температуры от +35 до +15°C и загрузки системы от 100 до 50 % производительности**



В дополнение к традиционным системам с воздушным охлаждением конденсатора существуют также решения с водяным охлаждением, которые находят применение как в VRF-системах, так и в чиллерных установках. Эти системы обладают собственным коэффициентом энергоэффективности, который существенно выше, чем у воздушных аналогов.

Однако необходимо принимать во внимание термодинамические аспекты: согласно второму закону термодинамики, все процессы, проходящие через промежуточные теплообменники, увеличивают энтропию системы и, следовательно, требуют дополнительных энергетических затрат. Наличие в водяных системах дополнительного водяного контура для охлаждения конденсатора делает их менее эффективными по сравнению с системами, использующими прямое воздушное охлаждение.

Рассмотрим более детально показатели энергоэффективности различных типов систем охлаждения (табл. 2).

ESEER для воздушного VRF:

$$ESEER = 0,03 \cdot (50 / 12,68) + 0,33 \cdot (37,5 / 9,51) + 0,41 \times (25 / 6,34) + 0,23 \cdot (12,5 / 3,17) = 3,94$$

ESEER для водяного VRF:

$$\text{ESEER} = 0,03 \cdot (22,8 / 8,53) + 0,33 \cdot (17,1 / 6,4) + 0,41 \times \\ \times (11,4 / 4,27) + 0,23 \cdot (5,7 / 2,13) = 2,67$$

ESEER для водяного чиллер:

$$\text{ESEER} = 0,03 \cdot (131 / 52,29) + 0,33 \cdot (98,25 / 39,22) + 0,41 \times \\ \times (65,5 / 26,15) + 0,23 \cdot (32,75 / 13,07) = 2,51$$

Таблица 2

Охлаждение конденсатора	VRF, воздушное	VRF, водяное	Чиллер, водяной
Производительность по каталогу, кВт	50,0	25,2	155,0
Охлаждающая среда, фактические условия	Воздух +35	Вода +45	Вода +45
Производительность фактическая, кВт	50,0	22,8	131,0
Энергопотребление, кВт	12,5	5,9	36,8
Коэффициент EER источника холода	4,0	3,86	3,56
Энергопотребление внутренних блоков, кВт	0,18	0,09	0,90
Энергопотребление сухого охладителя	нет	1,78	8,55
Энергопотребление насосов конденсатора	нет	0,76	3,8
Энергопотребление насосов внутреннего контура	нет	нет	2,44
<b>Итого энергопотребление</b>	<b>12,68 кВт</b>	<b>8,53 кВт</b>	<b>52,29 кВт</b>
<b>Итого ESEER</b>	3,94	2,67	2,51

Проведенный анализ выявил существенные изменения в работе систем кондиционирования. Водяные системы демонстрируют

значительное снижение эффективности: при неизменных параметрах охлаждающей воды объем производимого холода уменьшился. Параллельно с этим отмечается увеличение энергопотребления.

Особенно показательны данные по коэффициенту энергетической эффективности (ESEER):

- Для водных систем показатель ESEER снизился до 3,8 и 3,6;
- У VRF-систем с воздушным охлаждением от того же производителя ESEER составляет 4,0.

При учете совокупного энергопотребления картина выглядит следующим образом:

- VRF с воздушным охлаждением: ESEER = 3,94;
- VRF с водяным охлаждением: ESEER = 2,67;
- Чиллер с водяным охлаждением: ESEER = 2,51.

Эти данные наглядно демонстрируют преимущество VRF-систем с воздушным охлаждением в плане энергоэффективности по сравнению с водяными системами кондиционирования.

Анализ показывает, что показатели энергоэффективности VRF-систем и чиллеров с водяным охлаждением конденсатора оказываются в 1,5–2 раза ниже по сравнению с VRV-системами, оснащенными воздушным охлаждением.

В результате сравнения можно сделать однозначный вывод: современные VRF-системы с воздушным охлаждением конденсатора демонстрируют наивысшую энергоэффективность среди всех рассматриваемых решений. При одинаковой производительности они расходуют меньше электроэнергии по сравнению с системами типа «чиллер-фанкойл».

### Литература

1. Система Чиллер-фанкойл | Схемы и принцип работы систем чиллер-фанкойл. URL: [[https://dantex.ru/articles/sistema\\_chillerfankojl/](https://dantex.ru/articles/sistema_chillerfankojl/)].
2. Заплаткина П. А., Ямлеева Э. У. Сравнительный анализ VRF систем и «чиллер-фанкойлы» // Сборник трудов Международной молодежной школы «ИНЖЕНЕРИЯ-XXI». Сборник тезисов молодежной школы при IV Международной научно-практической конференции «Инженерно-техническое образование и наука» (ИТОН-2024). Новороссийск, 2024.
3. Реальная энергоэффективность систем кондиционирования. URL:[<http://www.klimats.ru/blog/?p=1163>].

**УДК 628.8**

*Александра Витальевна Марченко,*  
канд. техн. наук, доцент  
*Анастасия Александровна Воронина,*  
студент  
(Ульяновский государственный  
технический университет)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*vnasty\_a123@mail.ru*

*Alexandra Vitalievna Marchenko,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
*Anastasia Alexandrovna Voronina,*  
student  
(Ulyanovsk State  
Technical University)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*vnasty\_a123@mail.ru*

**СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ  
ВАРИАНТОВ ИСПОЛНЕНИЯ ПРИТОЧНО-  
ВЫТЯЖНОЙ ВЕНТИЛЯЦИИ  
В МНОГОКВАРТИРНОМ ЖИЛОМ ДОМЕ  
В ГОРОДЕ УЛЬЯНОВСКЕ**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF VENTILATION SYSTEMS  
WITH AND WITHOUT HEAT RECOVERY USING  
THE EXAMPLE OF A MULTI-APARTMENT RESIDENTIAL  
BUILDING IN THE CITY OF ULYANOVSK**

Нормативные и методические документы в области проектирования систем вентиляции жилых многоквартирных зданий указывают на целесообразность и необходимость применения современных систем вентиляции с устройствами, оптимизирующими работу вентиляционных систем на стадии их эксплуатации.

Одним из технических решений, позволяющих реализовать регулируемый воздухообмен в зданиях, являются системы приточно-вытяжной вентиляции с рекуператором теплоты.

*Ключевые слова:* рекуператор, тепло, гибридная система вентиляции, энергоэффективность, установка, жилое здание, энергия, приточный воздух.

Regulatory and methodological documents in the field of designing ventilation systems for residential multi-apartment buildings indicate the feasibility and necessity of using modern ventilation systems with devices that optimize the operation of ventilation systems at the stage of their operation.

One of the technical solutions that allows implementing controlled air exchange in buildings is a supply and exhaust ventilation system with a heat recuperator.

*Keywords:* recuperator, heat, hybrid ventilation system, energy efficiency, installation, residential building, energy, supply air.

В современном мире вопрос энергоэффективности занимает одно из важнейших мест в области строительства и эксплуатации жилых зданий. По данным Международного энергетического агентства, на здания приходится около 40 % мирового потребления энергии, а системы отопления вентиляции и кондиционирования являются одними из основных потребителей энергии в зданиях. Повышение энергоэффективности данных систем может привести к значительной экономии энергии. Одним из способов повышения энергоэффективности систем вентиляции является рекуператор теплоты.

Рекуператор – это установка, теплоноситель в которой движется направленно. Установка предполагает наличие локальной системы вентиляции, причем тепло удаляемого воздуха утилизируется тут же [1].

Принцип работы приточно-вытяжной вентиляции с рекуператором изображен на рис. 1. Вытяжной воздух удаляется из помещения, в то же время наружный воздух подается в помещение. В рекуператоре тепло вытяжного воздуха передается на стенки теплообменника, в результате нагревается холодный приточный воздух. Этот процесс осуществляется без смешивания потоков, что предотвращает попадание загрязнений с вытяжного потока в приточный. После нагрева, приточный воздух с заданной температурой поступает в помещение, что позволяет поддерживать комфортный микроклимат. Такая система предотвращает резкие перепады температур и термическое воздействие на людей.

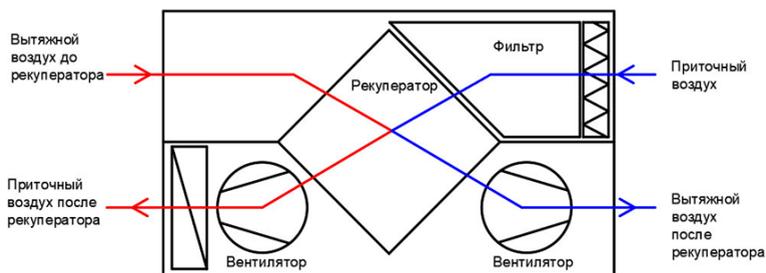


Рис. 1. Принцип работы приточно-вытяжной вентиляции с рекуператором

Для более точного понимания выгоды использования рекуператора, проведен сравнительный анализ системы приточно-вытяжной

вентиляции с утилизатором теплоты и общеобменной системы вентиляции с механическим побуждением вытяжки.

Одним из главных недостатков естественной приточной системы вентиляции в МКД заключается в отсутствии подготовки приточного воздуха. Приточный воздух поступает в помещение непосредственно с улицы с температурой наружного воздуха. В таком случае его подогрев воздуха ложится на систему отопления [3].

Рассчитаем какое количество теплоты необходимо для обогрева квартиры студии в многоквартирном жилом доме в городе Ульяновске.

Примем:

Расчетные параметры приняты по СП 131.13330.2020 для г. Ульяновска [2]:

- Для холодного периода  $t_{нар.} = -33$  °С (параметр Б);
- Для теплого периода  $t_{нар.} = 24$  °С (параметр А);
- Средняя температура наружного воздуха за отопительный период:  $t_{ср.} = -4,5$  °С;

Температуры подающего и обратного трубопровода систем отопления:  $-80-60$  °С.

Параметры внутреннего воздуха приняты по ГОСТ 30494-2011:

- в жилых комнатах  $21$  °С, в угловых жилых комнатах  $23$  °С,
- в кухнях, туалетах, межкомнатных коридорах  $19$  °С;
- в ваннных, совмещенных санузлах  $24$  °С.

Объем удаляемого воздуха:

– Кухни –  $60$  м<sup>3</sup>/час (для многоквартирных жилых домов с электроплитами);

- Туалеты –  $25$  м<sup>3</sup>/час;
- Ваннные комнаты –  $50$  м<sup>3</sup>/ч;
- Совмещенный санузел –  $50$  м<sup>3</sup>/ч.

Вытяжной воздух удаляется через вентиляционные решетки из наиболее загрязненных зон (кухонь и санузлов). Шахты имеют спутниковую схему, с присоединением отдельных каналов к сборному каналу. Удаление вытяжного воздуха происходит за счет работы вентилятора расположенного на кровле дома. Вентилятор работает непрерывно, обеспечивая своевременное удаление загрязненного и чрезмерно влажного воздуха из санузлов и кухонь. Поступление

приточного воздуха осуществляется через приточные оконные клапаны. Эти клапаны устанавливаются в оконные рамы и обеспечивают поступление наружного воздуха в квартиру (рис. 2).

В данном случае количество удаляемого воздуха равно  $110 \text{ м}^3/\text{час}$ , следовательно, необходимо компенсировать  $110 \text{ м}^3/\text{час}$  приточного воздуха через оконные клапаны.

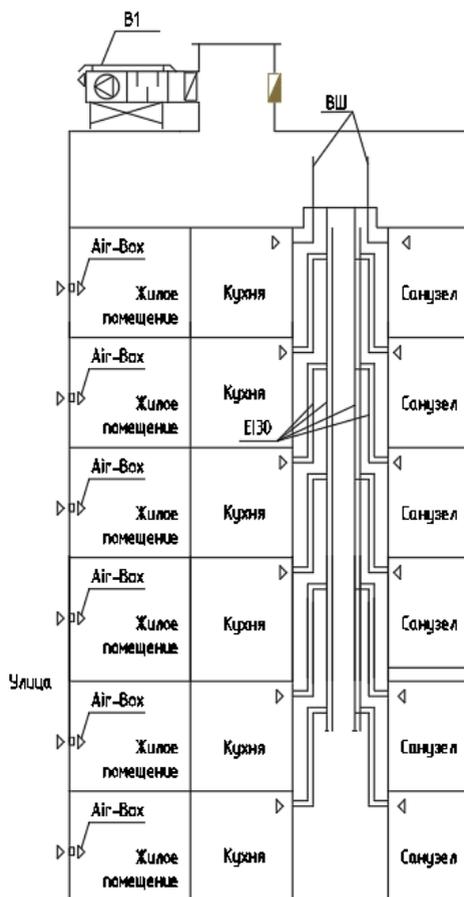


Рис. 2. Принципиальная схема гибридной системы вентиляции без рекуператора

Потери тепла на подогрев заданного объема воздуха ( $110\text{м}^3$ ) =  $2175\text{ Вт}$

Потери тепла на подогрев инфильтрующегося воздуха ( $G = 5\text{ кг}/(\text{м}^2\text{ч})$ ) через неплотности ограждений =  $65\text{ Вт}$

Теплопоступления с площади пола:  $151\text{ Вт}$

Итого потери теплоты составляют:  $(2175 + 356,57) - 151 = 2385$  (округление до  $5\text{ Вт}$ )

Тепловая нагрузка на систему отопления из-за подогрева приточного воздуха составляет  $2175\text{ Вт}$ .

Во втором случае в многоквартирном доме предусмотрена вентиляция с механическим побуждением и утилизацией теплоты вытяжного воздуха для нагрева приточного. Приточно-вытяжная установка находится в венткамере. Приточно-вытяжная установка оснащена пластинчатым теплообменником и вентиляторами. В состав комплектации установки входят средства автоматизации и пульт управления, позволяющий регулировать воздухопроизводительность установки [3].

В рекуператоре вытяжной воздух нагревает приточный до  $10\text{ }^\circ\text{C}$  (при температуре наружного воздуха  $-33\text{ }^\circ\text{C}$ ). Компенсация дефицита теплоты на нагрев приточного воздуха осуществляется водяным калорифером.

Объем приточного воздуха принят для возмещения вытяжки из помещений санузла, ванны, кухни. Приточный воздух распределяется через звукопоглощающие воздуховоды по жилым помещениям. Фрагмент принципиальной схемы системы вентиляции с рекуператорами тепла представлена на рис. 3.

Итоги расчета теплопотерь без подогрева приточного воздуха системой отопления (см. таблицу).

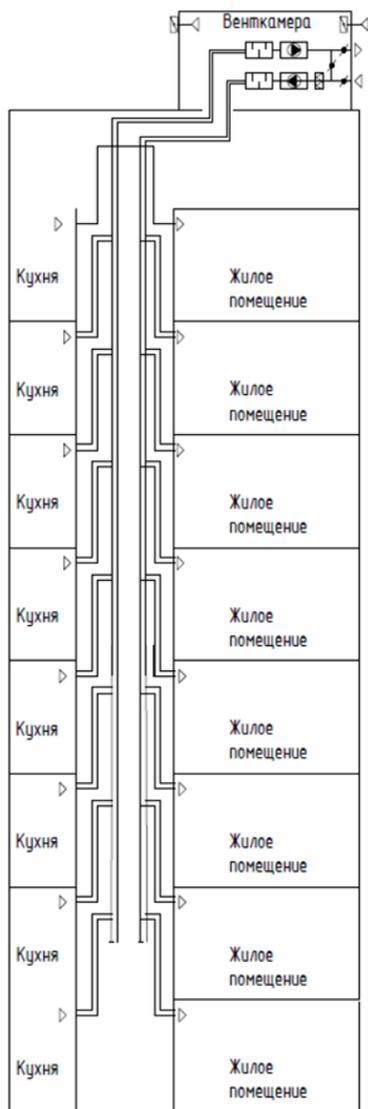


Рис. 3. Фрагмент принципиальной схемы системы вентиляции с рекуператорами тепла

## Итоги расчета потерь теплоты

Наименование	А	Б	Площадь	Ориентация	Попр. коэф. или $t$	Расчетная высота	Термическое сопротивление, $R_0 \text{ м}^2 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$R_{\text{и}} \text{ м час. Па/кг Стен} \times \text{Сн кг}/(\text{м}^3 \text{ ч})$ длина стык, м	Надавки	Потери тепла на нагрев инфильтрующегося воздуха (через неплотности)	Надавка на высоту отражения $> 4 \text{ м}$	Трансмиссионные потери тепла
НС	3,2	3	6,41	ЮЗ	0	0	3,23	0	0	0	1	107,2
ОКНО	1,8	1,77	3,19	ЮЗ	0	5,93	0,69	5	0	65,06	1	249,3
Итого:			9,6							65,06		356,57

Потери теплоты на подогрев заданного вентилируемого объема = 0,00 Вт

Инфильтрация: потери тепла на подогрев инфильтрующегося воздуха ( $G = 5 \text{ кг}/(\text{м}^2\text{ч})$ ), через неплотности ограждений = 65 Вт

Теплопоступления с площади пола: 151 Вт

Итого потери:  $356,57 + 65,06 - 150,6 = 275 \text{ Вт}$  (округление до 5 Вт.)

Проведем расчет расхода теплоты на калорифере при заданных условиях

1. Рассчитываем расход тепла калорифером без рекуператора:

Расчет расхода тепла калорифером по формуле (1) [4]:

$$Q_T = L \cdot \rho_{\text{возд.}} \cdot c_{\text{возд.}} \cdot (t_{\text{вн.}} - t_{\text{нар.}}), \quad (1)$$

где  $Q_T$  – тепловая мощность калорифера, Вт;  $\rho_{\text{возд.}}$  – плотность воздуха;  $c_{\text{возд.}}$  – удельная теплоемкость воздуха, равная  $1 \text{ кДж}/(\text{кг}\cdot\text{К}) = 0,24 \text{ ккал}/(\text{кг}\cdot\text{°C})$ ;  $t_{\text{вн.}}$  – температура воздуха на выходе из калорифера, °C;  $t_{\text{нар.}}$  – температура наружного воздуха, °C (температура воздуха наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92 по СП 131.13330.2020).

$Q = 110 \cdot 1,225 \cdot 0,24 \cdot (21 - (-33)) = 1746,36 \text{ Вт}$  – теплоты затрачивается на нагрев приточного воздуха без теплоты удаляемого воздуха.

2. Рассчитываем температуры приточного воздуха после рекуператора.

Примем, что температура воздуха после рекуператора  $10 \text{ °C}$ , а температура удаляемого воздуха  $23 \text{ °C}$

2.1. Расчет КПД (коэффициента эффективности) рекуператора (2):

$$K = (t_p - t_n) / (t_b - t_n) \quad (2),$$

где  $t_p$  – температура притока после рекуператора, °C;  $t_n$  – температура наружного уличного воздуха, °C;  $t_b$  – температура вытяжки из помещения, °C.

$$K = (10 - (-33)) / (23 - (-33)) = 0,77 = 77 \%$$

2.2. Расчет температуры приточного воздуха после рекуператора (3):

$$t_p = K \cdot (t_b - t_n) + t_n, \quad (3)$$

где  $K$  – КПД рекуператора, %;  $t_b$  – температура вытяжки из помещения, °C;  $t_n$  – температура наружного уличного воздуха, °C.

$$t_p = 0,77 \cdot (23 - (-33)) + (-33) = 10,12 \text{ °C}$$

2.3. Рассчитываем расход тепла калорифером после рекуператора:

$$Q = 110 \cdot 1,225 \cdot 0,24 \cdot (10 - (-33)) = 1390,62 \text{ Вт}$$

Экономия составляет:

$$Q = 1746,36 - 1390,62 = 355,74 \text{ Вт}$$

Экономия теплоты по сравнению с первым случаем составит:

$$Q = 2175 - 1390,62 = 784,4 \text{ Вт}$$

Рассчитаем экономию энергии за отопительный период для города Ульяновска (4) [4]:

$$E = L \cdot C_p \cdot \rho \cdot (T_r - T_oa) \cdot n \cdot D \cdot tv / 1000 \text{ кВт/ч}, \quad (4)$$

где  $n$  – эффективность рекуператора,  $L$  – объем приточного воздуха ( $\text{м}^3/\text{ч}$ ),  $C_p$  – теплоемкость воздуха ( $\text{Вт}/\text{кг} \text{ °C}$ ),  $\rho$  – плотность воздуха ( $\text{кг}/\text{м}^3$ ),  $T_r$  – наружная температура воздуха ( $\text{°C}$ ),  $T_oa$  – температура в помещении ( $\text{°C}$ ),  $D$  – длина отопительного периода (дни),  $tv$  – время работы вентиляции (часы).

Подставляем исходные данные:

$E = 110 \cdot 1,2 \cdot 0,28 \cdot (21 - (-4,5)) \cdot 0,77 \cdot 205 \cdot 24 / 1000 = 3570 \text{ кВт/ч}$  – экономия тепловой энергии, рассчитанная на одну квартиру студию с расходом приточного воздуха  $110 \text{ м}^3/\text{ч}$ .

Таким образом, использование системы вентиляции с рекуператором является более эффективным и выгодным решением по сравнению с обычной системой, так как позволяет снизить расход тепла на 784,4 Вт только лишь для одной квартиры студии. Это приведет к уменьшению металлоемкости системы отопления, уменьшению диаметров труб и, как следствие, экономии как на общей нагрузке на систему отопления, так и на первоначальных затратах на монтаж и оборудование.

Сравнительный анализ показывает, что, увеличив первоначальные вложения в вентиляционную систему мы обеспечиваем значительную экономию средств, в течение эксплуатационного периода.

Теплопотери без подогрева приточного воздуха системой отопления на 2175 Вт меньше, чем при гибридной системе вентиляции с естественным притоком через оконные клапаны. Экономия тепловой энергии за отопительный период квартиры студии с расходом приточного воздуха 110 м<sup>3</sup>/ч составит 3570 кВт/ч.

В Ульяновске тепловая энергия уже используется вторично в подобных вентиляционных установках. Но это единичные случаи, и зданий, которые не имеют в своих системах вентиляции блоков рекуперации большинство. Поэтому огромное количество дорогой тепловой энергии выбрасывается в окружающую среду. Это происходит из-за стремления многих застройщиков «удешевить» стоимость квадратного метра своих объектов за счет систем микроклимата.

### Литература

1. Хрусталева Б. М. Энергоэффективные системы вентиляции и кондиционирования воздуха / Б. М. Хрусталева, А. П. Несенчук. – Минск : Белорусская наука, 2020. – 431 с.
2. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-1999. М. :ФГБУ «РСТ», 2022; М. :ФГБУ «РСТ», 2023.
3. Борисов А. А. Оценка эффективности рекуператоров в системах вентиляции и кондиционирования воздуха. Москва : Ленанд, 2016.
4. Григорьев С. С. Сравнительный анализ типов рекуператоров для интеграции в вентиляционные системы. Москва : Наука и техника, 2012.

**УДК 628.8**

*Александра Витальевна Марченко,*  
канд. техн. наук, доцент  
*Кристина Андреевна Кольцова,*  
студент  
(Ульяновский государственный  
технический университет)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*koltsovakristina01@mail.ru*

*Alexandra Vitalievna Marchenko,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
*Kristina Andreevna Koltsova,*  
student  
(Ulyanovsk State  
Technical University)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*koltsovakristina01@mail.ru*

**РАСЧЕТ ВОЗДУШНОГО ДУШИРОВАНИЯ  
НА СОВРЕМЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ**

**CALCULATION OF AIR CONDITIONING  
IN MODERN PRODUCTION**

Воздушное душирование – это инновационный метод охлаждения и вентиляции, который находит применение в помещениях с высокой тепловой нагрузкой. Эта система обеспечивает равномерное распределение прохладного воздуха, создавая комфортные условия для пользователей и оптимизируя микроклимат. В процессе воздушного душирования используется специализированное оборудование, позволяющее контролировать такие параметры воздушных потоков, как температура, влажность и скорость. Это предотвращает перегрев и поддерживает стабильный уровень комфорта. Данная работа будет особенно полезна для специалистов в области вентиляции и кондиционирования, а также для инженеров, занимающихся проектированием систем климат-контроля.

*Ключевые слова:* воздушное душирование, микроклимат, промышленная вентиляция, расчет параметров микроклимата, расчет воздушного душирования.

Air showering is an innovative method of cooling and ventilation, which finds application in rooms with high heat load. This system ensures an even distribution of cool air, creating comfortable conditions for users and optimizing the microclimate. In the process of air showering, specialized equipment is used to control air flow parameters such as temperature, humidity and speed. This prevents overheating and maintains a stable comfort level. This work will be especially useful for specialists in the field of ventilation and air conditioning, as well as for engineers involved in the design of climate control systems.

*Keywords:* air showering, microclimate, industrial ventilation, calculation of microclimate parameters, calculation of air showering.

Воздушное душирование представляет собой одну из наиболее действенных стратегий для борьбы с лучистым теплом и вредными газами. Эта система подает подогретый или охлажденный воздух сверху с помощью специализированных устройств, обеспечивая работников свежим и увлажненным воздухом. Настраивая скорость воздушного потока, можно эффективно снизить температуру на рабочем месте, создавая комфортные условия для сотрудников [1, 5]. В определенных ситуациях воздух поступает в рабочую зону через гибкие прорезиненные шланги, соединенные с мобильной установкой для воздушного душирования. Этот подход обеспечивает высокую гибкость и адаптивность системы, позволяя эффективно направлять свежий воздух именно туда, где он наиболее необходим. Система воздушного душирования состоит из нескольких ключевых компонентов (см. рисунок): регенерируемый фильтр первичной очистки, вентилятор, воздуховоды, воздухораспределитель с фильтром вторичной очистки [1, 5].

Воздухораспределитель устанавливается непосредственно над рабочей зоной, а встроенный фильтр вторичной очистки гарантирует равномерное распределение воздуха по всей поверхности устройства. Этот фильтр служит дополнительной защитой на случай, если первичный фильтр выйдет из строя, обеспечивая тем самым стабильное качество воздуха и комфорт для работников [1, 5].

Получившийся поток очищенного воздуха начинает смешиваться с окружающим загрязненным воздухом по краям, а по центру формируется зона чистого и пригодного для дыхания воздуха (см. рисунок).

Воздушный душ устанавливается в следующих ситуациях [3, 4]:

1. Когда использование вентиляционных систем для обеспечения санитарно-гигиенических условий во всем помещении нецелесообразно;
2. При наличии небольшого числа работников с фиксированными рабочими местами;
3. При наличии источников лучистого тепла с интенсивностью более  $140 \text{ Вт/м}^2$ ;
4. Для предотвращения распространения вредных веществ на постоянные рабочие места в условиях открытых технологических процессов, когда невозможно установить укрытие или местную вытяжную вентиляцию.

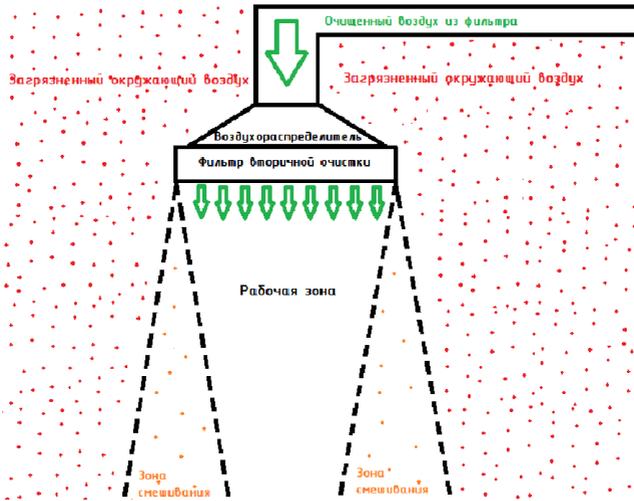


Схема воздушного душа

При выборе системы воздушного душирования важно провести глубокий анализ специфических потребностей предприятия, степени загрязнения и доступного бюджета. Это позволит не только обеспечить высокую эффективность, но и создать безопасные условия на рабочем месте. Такие системы могут быть индивидуально настроены под различные производственные процессы, что делает их универсальным решением для разнообразных отраслей [6].

Расчет воздушного душирования включает в себя несколько ключевых параметров, которые нужно учитывать для обеспечения эффективной работы системы [2]. Предположим, необходимо провести расчет системы местной вытяжной вентиляции для испытательного бокса, предназначенного для удаления аэрозолей, образующихся в процессе испытаний оборудования. Максимальное количество вредных выбросов не превышает  $V_{вр}^{max} = 1000 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Более 50 % по массе составляют фракции аэрозолей размером более 10 мкм. Начальная концентрация вредных веществ составляет  $C_H = 50 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Максимально допустимая концентрация в атмосфере  $C_{пдк}$  составляет  $10,0 \text{ мг}/\text{м}^3$ . Температура отходящих газов составляет  $120 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Оптимальная скорость струй воздуха определяется видом выделяющихся вредностей. По табл. 1 определяем оптимальную скорость струй воздуха на входе в местный отсос  $V_{\text{нопт}} = 1,25$  м/с.

Таблица 1

**Оптимальная скорость струй воздуха  
на входе в местный отсос  $V_{\text{нопт}} = 1,25$  м/с**

Вид вредности		$V$ , м/с
1	Тепло, водяной пар	0,3
2	Бензин, масла технические, другие вредные вещества с $C_{\text{пдк}} > 100$ мг/м <sup>3</sup>	0,5
3	Вредные вещества с $C_{\text{пдк}}$ от 100 до 10 мг/м <sup>3</sup>	0,8
4	Пыли, аэрозоли, дымы, пары, газы, туманы, вещества с $C_{\text{пдк}}$ от 10 до 2 мг/м <sup>3</sup>	1,25
5	Вещества по п. 4 при $C_{\text{пдк}}$ от 2 до 1 мг/м <sup>3</sup>	1,75
6	Вещества по п. 4 при $C_{\text{пдк}} < 1$ мг/м <sup>3</sup>	2,0
7	Особо токсичные и радиоактивные вещества с $C_{\text{пдк}} < 0,005$ мг/м <sup>3</sup>	3,0

Определим минимальную площадь проходного сечения местного отсоса  $Fh_{\text{мин}}$ , м<sup>2</sup>:

$$Fh_{\text{мин}} = \frac{V_{\text{вр}}^{\text{max}}}{V_{\text{нопт}}} = \frac{0,278}{1,25} = 0,222 \text{ м}^2. \quad (1)$$

Далее определяем объем воздуха, который поступает в местный отсос, равен максимальному количеству выбросов,  $V_{\text{вр}}$ , м<sup>3</sup>/с:

$$V_{\text{вр}} = V_{\text{вр}}^{\text{max}} = 0,278 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

Чтобы рассчитать количество вредных веществ, которое необходимо удалить, используем начальную концентрацию и объем:

$$L_M = C_H \cdot V_{вр} = 50 \cdot 0,278 = 13,89 \text{ мг/с} \quad (3)$$

Чтобы определить, сколько воздуха нужно для достижения максимально допустимой концентрации  $C_{пдк}$ , используем формулу:

$$V = \frac{L_M}{C_{пдк}} = \frac{13,89}{10} = 1,389 \text{ м}^3/\text{с} \quad (4)$$

Для улавливания аэрозолей, удаляемым местным отсосом, исходя из физико-химических свойств очищаемого воздуха и улавливаемой пыли выбираем в качестве очистного устройства скруббер Вентури ( $\eta = 95\%$  и гидравлическое сопротивление (табл. 2).

$$\Delta h_{СК} = 900 \text{ Н/м}^2.$$

Поскольку  $V_{необ} = 1,389 \text{ м}^3/\text{с}$  значительно превышает  $V_{вр}^{\max} = 0,2778 \text{ м}^3/\text{с}$  это означает, что система местной вытяжной вентиляции должна быть спроектирована так, чтобы обеспечить дополнительный объем воздуха для достижения допустимой концентрации.

Концентрация вредных выделений на выбросе в атмосферу  $C_{выб} = C_H(1 - \eta) = 50(1 - 0,95) = 2,5 \text{ мг/м}^3$  (что значительно ниже максимально разовой предельно допустимой концентрации  $C_{пдк} = 10 \text{ мг/м}^3$ ).

На следующем этапе проекта разрабатывается расчетная схема, которая делится на отдельные расчетные участки. Это позволяет провести гидравлический расчет сети вытяжной вентиляции. При этом суммируется сопротивление магистрали, принимая во внимание транспортировку запыленного воздуха, что позволяет определить общее сопротивление всей системы.

С учетом полученных значений производительности и сопротивления сети выбирается оптимальный вентилятор, который обеспечит необходимую установочную мощность для эффективной работы системы. Такой подход гарантирует, что вентиляция будет функционировать наилучшим образом, обеспечивая необходимый уровень чистоты и комфорта в помещении.

Таблица 2

Тип	Вид	Класс пылеуловителя	Область целесообразного применения							
			Эффективность очистки в % по дисперсности пыли, мкм							Сопротивление, Па
			>100	40–100	40–10	10–1	<1			
1	2	3	4	5	6	7	8	9		
Скрубберы	ВТИ-ПСИ скоростные промыватели СИОТ	3	–	–	70–90	–	–	900–1100		
		3	–	–	85–65	65–50	–	1200–1950		
	Струйные, мокрые: ПВМ	3	–	–	85–65	65–50	–	2000–3000		
		2	–	–	90–99	90–80	–	3000–4000		

К числу ключевых преимуществ расчета воздушного душирования можно отнести его экологическую значимость, которая напрямую связана с обеспечением надежной защиты здоровья сотрудников на опасных производствах. Эффективная система воздухообмена не только минимизирует риски возникновения легочных и онкологических заболеваний, но и помогает предотвратить аллергические реакции, раздражение глаз и головные боли.

Вторым важным преимуществом является экономическая эффективность данного подхода, проявляющаяся в снижении расходов на электроэнергию и повышении производительности труда работников. Местная вентиляция не только оптимизирует расход ресурсов, но и способствует дополнительному нагреву воздуха в производственных помещениях, что в свою очередь также помогает сократить затраты. Такой комплексный подход позволяет создавать более выгодные условия для бизнеса, улучшая как финансовые показатели, так и комфорт сотрудников.

### **Заключение**

Воздушное душирование представляет собой ключевое решение для создания безопасной и комфортной рабочей среды в производственных помещениях. Эффективно справляясь с лучистым теплом и токсичными газами, эта система не только улучшает качество воздуха, но и защищает здоровье сотрудников, предотвращая возникновение серьезных заболеваний.

Кроме того, экономическая выгода от применения воздушного душирования, проявляющаяся в значительном снижении затрат на электроэнергию и росте производительности труда, делает его привлекательным выбором для множества компаний. Учитывая все эти преимущества, внедрение систем воздушного душирования становится не просто необходимостью, а стратегическим шагом к устойчивому развитию и улучшению условий труда.

### **Литература**

1. *Кольцова К. А., Марченко А. В.* Применимость воздушного душирования на современном производстве // Сборник трудов Международной молодежной школы «ИНЖЕНЕРИЯ-XXI». Сборник тезисов молодежной школы при IV Международной научно-практической конференции «Инженерно-техническое образование и наука» (ИТОН-2024). Новороссийск, 2024.

2. Орлов Г. Г. Инженерные решения по охране труда в строительстве. Справочник строителя. М. : Стройиздат, 1985 – 278 с.
3. Учаскин П. В. Вентиляция, кондиционирование воздуха и отопление на предприятиях легкой промышленности. – М. : Легкая индустрия, 1980.
4. Волков О. Д. «Проектирование вентиляции промышленного здания», Х. : «Выща школа», 1989 г.
5. Кольцова К. А., Марченко А. В. Совершенствование вентиляции для улучшения макроклимата воздушным душированием // Современная наука: актуальные проблемы, достижения и инновации. Сборник статей по материалам пятой Всероссийской научно-практической конференции – Белебей, 2024.
6. Батурин В. В. Основы промышленной вентиляции. – 4-е изд. – Москва : Профиздат, 1990. – 448 с.

**УДК 628.8**

*Александра Витальевна Марченко,*  
канд. техн. наук, доцент  
*Никита Сергеевич Зудилов,*  
студент  
(Ульяновский государственный  
технический университет)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*n.zudilov@npt-c.ru*

*Alexandra Vitalievna Marchenko,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
*Nikita Sergeevich Zudilov,*  
student  
(Ulyanovsk State  
Technical University)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*n.zudilov@npt-c.ru*

## **СРАВНЕНИЕ РОТОРНЫХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ ОХЛАЖДЕНИЯ ВОЗДУХА**

### **COMPARISON OF ROTARY AIR-COOLING SOLUTIONS**

Эффективность систем кондиционирования воздуха (СКВ) напрямую зависит от множества факторов, включая конструкцию оборудования, параметры окружающей среды и особенности эксплуатации. Одним из ключевых элементов современных СКВ являются роторные рекуператоры, которые обеспечивают рекуперацию тепла и влаги, что позволяет значительно снизить энергозатраты на охлаждение и обогрев помещений. В последние годы также активно исследуется влияние увлажнения на эффективность работы роторных рекуператоров, что открывает новые возможности для оптимизации климатических систем.

*Ключевые слова:* вентиляция, СКВ, рекуператор, энергозатраты, климат.

The effectiveness of air conditioning systems directly depends on many factors, including equipment design, environmental parameters, and operational characteristics. One of the key elements of modern heating systems are rotary heat recuperators, which provide heat and moisture recovery, which significantly reduces energy consumption for cooling and heating rooms. In recent years, the effect of humidification on the efficiency of rotary heat exchangers has also been actively investigated, which opens up new opportunities for optimizing climate systems.

*Keywords:* ventilation, SLE, recuperator, energy consumption, climate.

Цель данной работы – исследование влияния работы роторного рекуператора и работы увлажнения на мощность водяного охлаждения в статичных климатических условиях. В рамках исследования планируется провести анализ эффективности работы роторных рекуператоров с различными уровнями увлажнения, а также оценить влияние увлажнения на энергопотребление и производительность

СКВ. Полученные результаты позволят определить оптимальные параметры работы роторных рекуператоров.

Роторный рекуператор – это устройство, используемое в системах вентиляции и кондиционирования воздуха для рекуперации (повторного использования) тепла и влаги из вытяжного воздуха перед его выбросом наружу. Он представляет собой вращающийся теплообменник, состоящий из множества каналов, через которые проходят потоки приточного и вытяжного воздуха.

Принцип работы роторного рекуператора:

1. Вращение ротора: Ротор, состоящий из металлических пластин, вращается между потоками приточного и вытяжного воздуха.
2. Теплообмен: Приточный и вытяжной воздух проходят через каналы ротора, обмениваясь теплом и влагой.
3. Рекуперация тепла: тепло от вытяжного воздуха передается приточному воздуху, что позволяет снизить энергозатраты на нагрев или охлаждение приточного воздуха.
4. Увлажнение: В процессе теплообмена влага из вытяжного воздуха может передаваться приточному воздуху, что позволяет поддерживать оптимальную влажность в помещении.

Преимущества роторных рекуператоров:

– Высокая эффективность: Роторные рекуператоры могут достигать КПД до 90 %, что делает их одними из самых эффективных устройств для рекуперации тепла и влаги.

– Энергоэффективность: Использование роторных рекуператоров позволяет значительно снизить энергозатраты на отопление и кондиционирование воздуха.

– Гибкость: они могут использоваться в различных климатических условиях и для различных типов помещений.

Недостатки роторных рекуператоров

– Сложность конструкции: требуют точной настройки и регулярного обслуживания.

– Ограничения по влажности: не подходят для работы с очень влажным воздухом.

В таблице приведены расчеты воздуха с различными типами роторных рекуператоров и различным использованием увлажнения в притоке и вытяжке.

Таблица

Сравнение охладителей	Установка со стандартным ротором (энтальпийный, гибрид)	Установка с Сорбционным ротором	Увлажнение вытяжного воздуха, ротор алюминиевый	Увлажнение вытяжного воздуха, ротор энтальпийный (гибрид)	Увлажнение приточного воздуха до рекуператора, рекуператор Сорбционный
	10 000 м <sup>3</sup> /час 30° / 40% (10,6 г/кг)	10 000 м <sup>3</sup> /час 30° / 40% (10,6 г/кг)	10 000 м <sup>3</sup> /час 30° / 40% (10,6 г/кг)	10 000 м <sup>3</sup> /час 30° / 40% (10,6 г/кг)	10 000 м <sup>3</sup> /час 30° / 40% (10,6 г/кг)
Расход воздуха	10 000 м <sup>3</sup> /час	10 000 м <sup>3</sup> /час	10 000 м <sup>3</sup> /час	10 000 м <sup>3</sup> /час	10 000 м <sup>3</sup> /час
Температура/влажность уличная	30° / 40% (10,6 г/кг)	30° / 40% (10,6 г/кг)	30° / 40% (10,6 г/кг)	30° / 40% (10,6 г/кг)	30° / 40% (10,6 г/кг)
Температура/влажность в помещении	24° / 50% (9,3 г/кг)	24° / 50% (9,3 г/кг)	24° / 50% (9,3 г/кг)	24° / 50% (9,3 г/кг)	24° / 50% (9,3 г/кг)
Увлажнитель на вытяжке	нет	нет	ДА	ДА	нет
Увлажнитель на притоке	нет	нет	нет	нет	ДА
Температура/влажность на входе в ротор, приток	30° / 40% (10,6 г/кг)	30° / 40% (10,6 г/кг)	30° / 40% (10,6 г/кг)	30° / 40% (10,6 г/кг)	22,3° / 80% (14,5 г/кг)
Температура/влажность на входе в ротор, вытяжка	24° / 50% (9,3 г/кг)	24° / 50% (9,3 г/кг)	19,2° / 80% (11,1 г/кг)	19,2° / 80% (11,1 г/кг)	24° / 50% (9,3 г/кг)

Окончание таблицы

Сравнение охлаждений	Установка со стандартным ротором (энталпийный, гибрид)	Установка с Сорбционным ротором	Увлажнение вытяжного воздуха, ротор алюминированный	Увлажнение вытяжного воздуха, ротор энталпийный (гибрид)	Увлажнение приточного воздуха до рекуператора, рекуператор Сорбционный
Температура/влажность на выходе из ротора, приток	25,5° / 49,7% (10,1 г/кг)	25,5° / 47,9% (9,7 г/кг)	21,9° / 64,8% (10,6 г/кг)	21,8° / 65,9% (10,78 г/кг)	23,6° / 58,6% (10,63 г/кг)
Температура/влажность на выходе из ротора, вытяжка	28,5° / 40,35 (9,78 г/кг)	28,5° / 41,8% (10,17 г/кг)	27,3° / 48,9% (11,1 г/кг)	27,4° / 48,1% (10,91 г/кг)	22,7 / 70,4% (12,15 г/кг)
Переносимая мощность	19	23	28	26	19,7
Используемый охладитель	CW.3	CW.3	CW.2	CW.2	CW.3
Температура/влажность воздуха после охладителя	16,5° / 86,7% (10,1 г/кг)	16,5° / 83,6% (9,7 г/кг)	17,2° / 87,1 (10,6 г/кг)	17,1° / 88,3% (10,78 г/кг)	16,7° / 89,7% (12,15 г/кг)
Требуемая холодильная мощность	30,5	30,5	16	16	23
Расход воды на увлажнение, м <sup>3</sup> /час	0	0	0,0234	0,0234	0,0375

Вывод: по выше представленной таблице, можно сделать вывод, что установки на базе алюминиевого роторного рекуператора и энтальпийного рекуператора (имеющего покрытие из силикогеля) в связке с увлажнением вытяжного воздуха, показывают хорошую эффективность и позволяют снизить затраты на холодильное оборудование практически в два раза.

#### **Литература**

1. *Батурин В. В.* Основы промышленной вентиляции. – 4-е изд. – Москва : Профиздат, 1990. – 448 с.
2. *Батурин В. В.* Передвижная воздухоохлаждающая установка для воздушных душей / В. В. Батурин, А. И. Шепелев. – Москва : Профиздат, 1938.
3. Вентиляционное оборудование // [Электронный ресурс] – режим доступа. – URL: <http://www.ruclimat.ru/catalog/>
4. Интеллектуальная система управления инженерными системами // [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL:<http://www.dom-intel.rumagazin/oborudovanie/kontrollery/beckhoff-bx9000.html/>
5. Климатические и вентиляционные системы // [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL:[http://www.vipvozduh.ru/index\\_page\\_161.html/](http://www.vipvozduh.ru/index_page_161.html/)
6. Принципы выбора систем кондиционирования воздуха и вентиляции // [Электронный ресурс] – Режим доступа. – URL:<http://www.climatepiter.com/>

УДК 697.9

*Александра Витальевна Марченко,*  
канд. техн. наук, доцент  
*Артем Сергеевич Козин,*  
магистрант  
(Ульяновский государственный  
технический университет)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*kozin-artem@mail.ru*

*Alexandra Vitalievna Marchenko,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
*Artem Sergeevich Kozin,*  
Master's degree student  
(Ulyanovsk State  
Technical University)  
*E-mail: al-marchenko@yandex.ru,*  
*kozin-artem@mail.ru*

## **АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИХ РЕШЕНИЙ НА ОБЩЕЕ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЕ ЖИЛОГО ДОМА**

### **ANALYSIS OF THE IMPACT OF ENERGY-SAVING SOLUTIONS ON THE OVERALL ENERGY CONSUMPTION OF A RESIDENTIAL BUILDING**

В статье исследуется влияние энергосберегающих технологий (солнечные батареи, рекуператор, тепловые трубки) на энергопотребление жилого дома в условиях холодного климата Ульяновска. Рассмотрены технические характеристики и экономическая эффективность каждой технологии. Солнечные батареи снижают затраты на электроэнергию, но окупаются за 8,8 лет. Рекуператор уменьшает теплопотери, особенно зимой, с окупаемостью 14,8 лет. Тепловые трубки, использующие тепло сточных вод, окупаются за 5,6 лет. Общая экономия от внедрения всех систем – 87 760 рублей в год, срок окупаемости – 9 лет. В долгосрочной перспективе экономия растет благодаря повышению тарифов на энергоресурсы. Использование этих технологий также снижает выбросы CO<sub>2</sub> и потребление невозобновляемых ресурсов, что способствует экологической устойчивости. Статья подчеркивает перспективность энергосберегающих решений для снижения затрат и повышения экологичности жилых домов.

*Ключевые слова:* энергосберегающие технологии, солнечные батареи, рекуператор, тепловые трубки, экономическая эффективность.

The article examines the impact of energy-saving technologies (solar panels, recuperator, heat pipes) on the energy consumption of a residential building in the cold climate of Ulyanovsk. The technical characteristics and economic efficiency of each technology are considered. Solar panels reduce electricity costs but have a payback period of 8.8 years. The recuperator reduces heat loss, especially in winter, with a payback period of 14.8 years. Heat pipes, which utilize heat from waste-

water, have a payback period of 5.6 years. The total savings from implementing all systems amount to 87,760 rubles per year, with a payback period of 9 years. In the long term, savings increase due to rising energy tariffs. The use of these technologies also reduces CO<sub>2</sub> emissions and the consumption of non-renewable resources, contributing to environmental sustainability. The article highlights the potential of energy-saving solutions for reducing costs and improving the environmental efficiency of residential buildings.

*Keywords:* energy-saving technologies, solar panels, recuperator, heat pipes, economic efficiency.

В условиях современных экологических и экономических вызовов энергоэффективность жилых домов становится одной из ключевых задач при их проектировании и эксплуатации. В России, где значительную часть года температура остается ниже комфортного уровня, отопление и подогрев воды являются основными статьями энергопотребления. Это обуславливает необходимость поиска инновационных решений для снижения тепловых потерь и рационального использования ресурсов.

В данной статье анализируется влияние солнечных батарей, рекуператора и тепловых трубок на снижение энергопотребления индивидуального жилого дома. Рассматриваются их технические характеристики, экономическая эффективность и влияние на эксплуатационные затраты.

Объектом исследования является индивидуальный жилой дом, расположенный в г. Ульяновск. Климатические условия региона характеризуются холодными зимами (средняя температура февраля  $-10,8$  °C) и умеренно теплым летом ( $+20$  °C в июле) [1]. Дом предназначен для круглогодичного проживания и оснащен стандартными инженерными системами.

Расчеты выполнены в соответствии с актуальными строительными нормами и правилами Российской Федерации.

Исследуемый дом представляет собой жилое здание общей площадью  $193,5$  м<sup>2</sup>, оснащенное газовым отоплением и потребляющее в среднем  $250$ – $300$  кВт·ч электроэнергии в месяц (табл. 1). Основной задачей является снижение тепловых потерь и уменьшение затрат на энергоресурсы за счет использования современных технологий энергосбережения.

Таблица 1

**Основные характеристики конструкций и инженерных систем**

Параметр	Значение
Общая площадь дома	193,5 м <sup>2</sup>
КПД газового котла	92,3%
Среднегодовая солнечная радиация	3,7 кВт·ч·м <sup>2</sup> /день
Тариф на электроэнергию [2]	3,16 руб/кВт·ч
Тариф на газ [3]	7,49 руб/м <sup>3</sup>

Первой задачей является расчет теплопотерь через ограждающие конструкции с учетом климатических данных. Результаты расчета приведены в табл. 2.

Таблица 2

**Результаты расчета теплопотерь**

Ограждающая конструкция	Теплопотери, кВт·ч/год
Стены	103 503
Окна	351 489
Кровля	63 081
Пол	139 783

**Эффективность солнечных батарей**

Солнечные панели, расположенные на крыше, преобразуют солнечное излучение в электрическую энергию. Вырабатываемый ток является постоянным и направляется в инвертор. Этот ключевой компонент системы отвечает за преобразование постоянного тока в переменный, который подходит для питания бытовых приборов и совместим с домовой электрической сетью.

После преобразования энергия поступает в сеть электроснабжения дома. Здесь она используется для работы различных приборов,

освещения и других нужд. Если выработка электроэнергии превышает текущие потребности, избыточная энергия направляется в городскую сеть. Это позволяет владельцу не только эффективно использовать солнечную энергию, но и передавать ее для общего потребления, получая вознаграждение за передачу электроэнергии [4].

Система состоит из 20 солнечных панелей с КПД 22,1 % и инвертора с КПД 98,6 %.

Экономия от системы была посчитана по формуле:

$$E_{\text{система}} = S_{\text{панель}} \cdot R \cdot \eta_{\text{панель}} \cdot N \cdot \eta_{\text{инвертор}} \cdot C_{\text{электричество}}, \quad (1)$$

где  $S_{\text{панель}}$  – площадь одной панели (1,95 м<sup>2</sup>);  $R$  – солнечная радиация (1180 кВт·ч/м<sup>2</sup>);  $\eta_{\text{панель}}$  – КПД панели (0,221);  $N$  – количество панелей (20 шт.);  $\eta_{\text{инвертор}}$  – КПД инвертора (0,986);  $C_{\text{электричество}}$  – тариф на электроэнергию (3,16 руб/кВт·ч).

$$E_{\text{система}} = 1,95 \cdot 1180 \cdot 0,221 \cdot 20 \cdot 0,986 \cdot 3,16 = 31\,687 \text{ руб./год}$$

- Летом генерируется избыточная энергия, которая может быть продана.

$$E_{\text{избыток}} = 9222 \text{ кВт·ч/год}$$

- Доход от избыточной энергии посчитан по формуле:

$$\text{Доход} = E_{\text{избыток}} \cdot C_{\text{продажа}} \quad (2)$$

$$\text{Доход} = 9222 \cdot 2 = 19\,844 \text{ руб./год}$$

$$\text{Общая экономия} = 31\,687 + 19\,844 = 51\,981 \text{ руб./год}$$

### Эффективность рекуператора

Приточно-вытяжная вентиляция с рекуператором Dantex DV-350HRE/PC (КПД 85 %) снижает теплопотери, возвращая часть тепла из вытяжного воздуха. Основной принцип работы устройства заключается в теплообмене между теплым выходящим и холодным входящим воздухом.

Для расчета эффективности рекуператора был определен объемный расход воздуха ( $L = 243,2 \text{ м}^3$ )

Теплопотери рассчитываются по формуле:

$$Q_{\text{вентиляция}} = L \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T \cdot t \quad (3)$$

где,  $\rho$  – плотность воздуха ( $1,2 \text{ кг/м}^3$ );  $c$  – удельная теплоемкость воздуха ( $0,28 \text{ Вт}\cdot\text{ч/кг}\cdot\text{°C}$ );  $\Delta T$  – температурный перепад ( $55 \text{ °C}$ ).

$$Q_{\text{вентиляция}} = 243,2 \cdot 1,2 \cdot 0,28 \cdot 55 \cdot 4920 = 22 \ 112,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

В нашем проекте предусмотрена баня, будем использовать тепло воздуха из бани, для подогрева приточного воздуха. Предусмотрим частоту использования бани 1 раз в неделю (52 раза в год) и продолжительность одного сеанса 3 часа.

Тепло, выделяемое баней, рассчитывается по формуле:

$$Q_{\text{бани}} = V_{\text{бани}} \cdot \rho \cdot c \cdot \Delta T_{\text{бани}} \cdot t \cdot N \quad (4)$$

где  $V_{\text{бани}}$  – объем бани ( $20,1 \text{ м}^3$ );  $\rho$  – плотность воздуха при  $80 \text{ °C}$  ( $0,986 \text{ кг/м}^3$ );  $\Delta T_{\text{бани}}$  – температурный перепад ( $113 \text{ °C}$ )

$$Q_{\text{бани}} = 20,1 \cdot 0,986 \cdot 0,28 \cdot 113 \cdot 3 \cdot 52 = 96,1 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Тогда теплопотери с учетом тепла от бани будут рассчитываться по формуле:

$$Q_{\text{скорректирован}} = Q_{\text{вентиляция}} - Q_{\text{бани}} \quad (5)$$

$$Q_{\text{скорректирован}} = 22 \ 112,1 - 96,1 = 22 \ 016 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Рекуператор компенсирует часть теплопотерь в соответствии с его КПД:

$$Q_{\text{компенсирован}} = Q_{\text{скорректирован}} \cdot \eta \quad (6)$$

$$Q_{\text{компенсирован}} = 22 \ 016 \cdot 0,85 = 18 \ 713,6 \text{ кВт}\cdot\text{ч/год}$$

Переведем это количество в кубометры газа (1 м<sup>3</sup> газа дает 9,5 кВт·ч):

$$V_{\text{газ}} = \frac{20\,274,8}{9,5} = 2134,2 \text{ м}^3$$

Стоимость сэкономленного газа:

$$\text{Экономия} = V_{\text{газ}} \cdot \text{Ц}_{\text{газ}} \quad (7)$$

где  $\text{Ц}_{\text{газ}} = 7,49 \text{ руб/м}^3$ .

$$\text{Экономия} = 2134,2 \cdot 7,49 = 15\,985,1 \text{ руб/год}$$

### Эффективность тепловых трубок

Тепловые трубки в данной системе представляют собой замкнутый контур, в котором осуществляется циркуляция теплоносителя. В испарителе, расположенном в канализационной трубе, теплоноситель нагревается за счет тепла сточных вод. Под воздействием температуры жидкость переходит в газообразное состояние (пар), который через паропровод поступает в конденсатор. Конденсатор, смонтированный в трубопровод холодной воды, передает теплоту поступающему потоку, нагревая его. После этого теплоноситель снова конденсируется в жидкость и по конденсаторопроводу возвращается в испаритель, где цикл повторяется [5].

$$Q_{\text{трубки}} = A \cdot U \cdot \Delta T \cdot t \quad (8)$$

где  $A$  – площадь теплообменника (1,57 м<sup>2</sup>);  $U$  – коэффициент теплообмена (120 Вт/м<sup>2</sup>·°С);  $\Delta T$  – температурная разница (25 °С).

$$Q_{\text{трубки}} = 1,57 \cdot 120 \cdot 25 \cdot 4920 = 23\,173,2 \text{ кВт} \cdot \text{ч/год}$$

Для компенсации теплопотерь без тепловых трубок потребуются газ. Рассчитаем необходимую энергию в газе с учетом КПД котла ( $\eta_{\text{котла}} = 92,3 \% = 0,923$ ):

$$Q_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{трубки}}}{\eta_{\text{котла}}} \quad (9)$$

$$Q_{\text{газ}} = \frac{23\,173,2}{0,923} = 25\,106,39 \text{ кВт} \cdot \text{ч}$$

Переведем это значение в объем газа:

$$V_{\text{газ}} = \frac{Q_{\text{газ}}}{9,5} \quad (10)$$

$$V_{\text{газ}} = \frac{25\,106,39}{9,5} = 2642,79 \text{ м}^3$$

Стоимость сэкономленного газа:

$$\text{Экономия} = V_{\text{газ}} \cdot \text{Ц}_{\text{газ}} \quad (11)$$

$$\text{Экономия} = 2642,79 \cdot 7,49 = 19\,794,4 \text{ руб./год}$$

Таблица 3

**Результат расчета экономической эффективности систем**

Система	Экономия (руб./год)	Стоимость (руб.)	Срок окупаемости (лет)
Солнечные батареи	51981	455400	8,8
Рекуператор	15985	236000	14,8
Тепловые трубки	19794	110000	5,6
Итого	87760	801400	9,1

Проведем дополнительный анализ на долгосрочную перспективу с учетом роста тарифа на электроэнергию 4 % и тарифа на газ 3 %  
Коэффициенты роста за 20 лет:

$$\text{Коэффициент}_{\text{электроэнергия}} = (1 + 0,04)^{20} = 2,19 \quad (12)$$

$$\text{Коэффициент}_{\text{газ}} = (1 + 0,03)^{20} = 1,81 \quad (13)$$

Экономия от систем за 20 лет:

$$E_{\text{солнечные}20\text{лет}} = E_{\text{солнечные}} \cdot \text{Коэффициент}_{\text{электричество}} \cdot 20 \quad (14)$$

$$E_{\text{солнечные}20\text{лет}} = 51981 \cdot 2,19 \cdot 20 = 2\,276\,767 \text{ руб}$$

$$E_{\text{газ}20\text{лет}} = (E_{\text{рекуператор}} + E_{\text{трубки}}) \cdot \text{Коэффициент}_{\text{газ}} \cdot 20 \quad (15)$$

$$E_{\text{газ}20\text{лет}} = (15\,985 + 19\,794) \cdot 1,81 \cdot 20 = 1\,295\,199 \text{ руб}$$

$$E_{20\text{лет}} = E_{\text{солнечные}20\text{лет}} + E_{\text{газ}20\text{лет}} \quad (16)$$

$$E_{20\text{лет}} = 2\,276\,767 + 1\,295\,199 = 3\,571\,966 \text{ руб.}$$

Анализ проведенных расчетов показал, что использование энергосберегающих технологий в индивидуальном жилом доме позволяет существенно снизить затраты на отопление и электричество. Внедрение солнечных батарей, рекуператора и тепловых трубок приводит к общей экономии в размере 87 760 руб./год.

Основные выводы:

- Солнечные батареи позволяют существенно снизить расходы на электроэнергию, но имеют относительно длительный срок окупаемости.
- Рекуператор уменьшает потери тепла за счет возврата части энергии из вентиляционного воздуха, что особенно эффективно в холодное время года.
- Тепловые трубки демонстрируют быструю окупаемость и эффективны при высоком расходе горячей воды.

Срок полной окупаемости всех систем составляет 9 лет. После этого эксплуатационные расходы дома значительно снижаются, обеспечивая долгосрочную экономию. Кроме того, применение данных технологий положительно влияет на экологию за счет уменьшения выбросов углекислого газа и сокращения потребления невозобновляемых энергоресурсов.

Внедрение таких решений является перспективным направлением в строительстве энергоэффективных зданий и позволяет значительно повысить комфорт проживания, снизить затраты на эксплуатацию дома и минимизировать воздействие на окружающую среду.

### **Литература**

1. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99\*. – М. : Минстрой России, 2018. – 67 с.
2. Актуальные тарифы на электроэнергию для населения и юридических лиц Ульяновской области на 2024 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ulenergo.ru> (дата обращения: 18.12.2024).
3. Актуальные тарифы на газ для населения и юридических лиц Ульяновской области на 2024 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://ulrg.ru/potrebitelyam/tsena-i-razmer-platezha-za-prirodnyy-gaz-s-01-07-2024.php> (дата обращения: 18.12.2024).
4. Федеральный закон от 27.12.2019 № 471-ФЗ «О внесении изменений в Федеральный закон «Об электроэнергетике»».
5. Научная публикация: Принципы работы тепловых трубок замкнутого контура // Вестник молодых ученых. – Белгород : Белгородский государственный технический университет им. В. Г. Шухова, 2023. – № 4. – С. 63–65.

**УДК 628.8**

*Павел Валерьевич Ротов,*  
д-р техн. наук, профессор  
*Павел Юрьевич Чеботарев,*  
студент  
(Ульяновский государственный  
технический университет)  
*E-mail: p.rotov@rambler.ru,*  
*en1t.www@gmail.com*

*Pavel Valerevich Rotov,*  
Dr. Sci. Tech., Professor  
*Pavel Urievich Chebotarev,*  
student  
(Ulyanovsk State  
Technical University)  
*E-mail: p.rotov@rambler.ru,*  
*en1t.www@gmail.com*

## **ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ В ТЕПЛОСНАБЖЕНИИ**

### **ENERGY-SAVING TECHNOLOGIES IN HEAT SUPPLY**

Теплоэлектроцентрали (ТЭЦ) традиционно играют ключевую роль в обеспечении теплоснабжения городов и промышленных объектов, сочетая производство электрической и тепловой энергии в едином технологическом процессе. Однако, несмотря на высокий коэффициент полезного действия комбинированной выработки энергии, системы теплоснабжения от ТЭЦ остаются энергоемкими и характеризуются значительными потерями как при транспортировке тепла, так и в процессе его потребления [1].

*Ключевые слова:* теплоснабжение, тепловая энергия, тепловые потери, транспортировка тепловой энергии, оптимизация теплосети.

Combined Heat and Power Plants have traditionally played a key role in providing heat supply to cities and industrial facilities, combining the production of electricity and thermal energy in a single technological process. However, despite the high efficiency of combined energy generation, district heating systems from CHP plants remain energy-intensive and are characterized by significant losses both during heat transportation and in the process of its consumption.

*Keywords:* district heating, thermal energy, heat losses, thermal energy transportation, district heating optimization.

Важность исследования и развитие энергосберегающих технологий заключается в их потенциале для решения комплексных задач: от снижения энергопотребления и повышения надежности систем до содействия глобальному переходу к устойчивой энергетике.

В данной статье рассматриваются основные направления модернизации систем теплоснабжения с использованием современных

энергосберегающих технологий, анализируются их технико-экономические преимущества.

Потери тепловой энергии подразделяются на три категории: 1) потери на источнике тепла; 2) потери при транспортировке; 3) потери у потребителя [1].

Потери на источнике тепла обусловлены несовершенством технологических процессов преобразования первичной энергии (например, химической энергии топлива) в тепловую энергию.

Основными причинами таких потерь являются: неполное сгорание топлива; теплообмен с окружающей средой через стенки котлов и теплообменников; выбросы тепла с дымовыми газами. Для снижения таких потерь могут быть применены следующие современные технологии:

Рекуперация тепла дымовых газов позволяет утилизировать тепло дымовых газов, которое в традиционных системах теряется. Например, использование конденсационных котлов позволяет извлекать дополнительное тепло за счет конденсации водяного пара, содержащегося в продуктах сгорания [2]. Это повышает КПД котла до 95–98 %. Рекуперативные теплообменники могут быть интегрированы как в существующие системы, так и в новые установки. Они особенно эффективны в условиях низкотемпературных систем отопления, где температура обратной воды ниже точки росы продуктов сгорания.

Внедрение систем автоматического регулирования в процесс горения, основан на использовании современных контроллеров и сенсоров, которые мониторят параметры работы котла (температуру, давление, содержание кислорода в дымовых газах) и корректируют подачу топлива и воздуха в реальном времени. Система обеспечивает оптимальное соотношение «топливо-воздух», что минимизирует выбросы оксидов азота (NOx) и углерода (CO), а также снижает риск образования золы и сажи. Примером таких технологий являются системы управления на базе PLC (программируемых логических контроллеров), которые могут быть интегрированы с облачными сервисами для удаленного мониторинга и анализа данных [3].

Использование теплоизоляционных материалов нового поколения постепенно вытесняют традиционные материалы, такие как минеральная вата или пенополистирол, они уступают более эффек-

тивными решениям: аэрогели, вакуумные панели и многослойные композиты. Эти материалы характеризуются крайне низкой теплопроводностью ( $0,015\text{--}0,02$  Вт/(м·К)) и способны существенно снизить потери тепла через стенки котлов, трубопроводов и других элементов системы. Например, применение аэрогелевых покрытий позволяет сократить теплопередачу на 40–60 %. Кроме того, такие материалы обладают высокой стойкостью к механическим нагрузкам и воздействию агрессивных сред.

Применение указанных технологий приводит к повышению КПД источников тепла на 10–15 %. Это снижает удельный расход топлива и, как следствие, эксплуатационные затраты. Несмотря на высокие капитальные затраты на внедрение новых технологий, срок окупаемости составляет 3–5 лет благодаря экономии на топливе и снижению экологических платежей за выбросы [4].

Потери при транспортировке тепловой энергии возникают в результате: теплопередачи через теплоизоляцию трубопроводов; утечек теплоносителя через неплотности.

Основным методом снижения теплопотерь является замена устаревшей теплоизоляции на современные материалы. Например, пенополиуретановая изоляция (ППУ) с защитной оболочкой из полиэтилена высокой плотности (ПЭВП) обеспечивает долговечность и высокую эффективность. ППУ имеет теплопроводность около  $0,025$  Вт/(м·К), что значительно ниже, чем у традиционных материалов. Дополнительно может применяться система оперативного дистанционного контроля (ОДК), которая позволяет отслеживать состояние изоляции и своевременно выявлять участки с повышенными потерями [5].

Для крупных магистралей возможно использование предизолированных труб с заводской теплоизоляцией, что гарантирует высокое качество и герметичность. Такие трубы также оснащаются сигнальными проводами для мониторинга состояния изоляции.

Внедрение автоматизации контроля утечек теплоносителя: установка датчиков давления и расхода на ключевых участках трубопроводов, использование ультразвуковых и акустических детекторов для выявления микротрещин и неплотностей, интеграция данных с ГИС (геоинформационными системами) для точного определения

местоположения аварийных участков. Все перечисленные варианты модернизации позволяют собирать данные в режиме реального времени и передавать их на центральный сервер для анализа. Это позволяет не только быстро реагировать на утечки, но и прогнозировать их возникновение на основе анализа трендов.

Модернизация трубопроводов требует значительных капитальных вложений, особенно при замене старых участков сетей. Однако снижение теплопотерь и уменьшение объема аварийных ремонтов приводят к долгосрочной экономии. Срок окупаемости таких мероприятий составляет 5–7 лет. Кроме того, улучшение качества теплоснабжения положительно влияет на уровень удовлетворенности потребителей [6].

Потери у потребителя связаны с неэффективным использованием тепловой энергии в зданиях основными причинами которых являются: высокая теплопередача через ограждающие конструкции; неоптимальная работа систем отопления и вентиляции; отсутствие учета потребления тепловой энергии.

Внедрение индивидуальных тепловых пунктов (ИТП) позволяют поддерживать оптимальный температурный график теплоносителя в зависимости от погодных условий, минимизировать потери в распределительных системах внутри здания и обеспечить учет потребления тепловой энергии на уровне каждого здания.

Современные ИТП оснащаются программным обеспечением для прогнозирования нагрузок и оптимизации работы системы.

Например, использование алгоритмов машинного обучения позволяет адаптировать работу ИТП под конкретные условия эксплуатации.

Установка приборов учета тепловой энергии для точного учета потребления тепла, которые измеряют расход теплоносителя и его температуру. Современные модели оснащаются модулями беспроводной передачи данных, что позволяет интегрировать их в системы удаленного мониторинга.

Кроме того, внедрение индивидуальных счетчиков тепла в многоквартирных домах стимулирует жителей к экономии энергии. Например, установка радиаторных счетчиков позволяет рассчитывать плату за отопление пропорционально фактическому потреблению в каждой квартире [7].

Важно правильное использование вентиляции в МКД, правильная организация необходимого приточного воздуха в квартирах за частую нарушается жильцами. Так как тепловая нагрузка заранее предполагает компенсацию, нагрев приточного воздуха в жилые помещения, при излишней герметичности нагрузка становится излишней в следствии чего сокращается потребление, путем местного регулирования. Это сказывается на повышении температуры обратного трубопровода, увеличивая количество полезно не реализованного теплоносителя.

Модернизация у потребителя требует значительных инвестиций, особенно в случае масштабного утепления зданий. Однако экономия на оплате тепловой энергии может достигать 25–40 %, что делает такие мероприятия экономически выгодными. Срок окупаемости составляет 5–10 лет в зависимости от региона и типа здания. Дополнительным преимуществом является повышение комфорта проживания и снижение экологической нагрузки [8].

Анализ потерь в системах теплоснабжения показывает, что наиболее значительные потери происходят на всех трех этапах: у источника тепла, при транспортировке и у потребителя. Современные энергосберегающие технологии позволяют существенно снизить эти потери, повысив общую эффективность системы теплоснабжения. Несмотря на высокие капитальные затраты на внедрение новых решений, их технико-экономические преимущества очевидны: снижение эксплуатационных расходов, уменьшение экологической нагрузки и повышение качества теплоснабжения. Таким образом, модернизация систем теплоснабжения является важным шагом на пути к устойчивому развитию энергетики.

### Литература

1. Повышение энергоэффективности в системах теплоснабжения Часть II. Потенциал и мероприятия энергосбережения в системах теплоснабжения [Электронный ресурс]. URL: [https://www.abok.ru/for\\_spec/articles.php?nid=4569/](https://www.abok.ru/for_spec/articles.php?nid=4569/)
2. Яковлев Б. В. Повышение эффективности систем теплофикации и теплоснабжения. М. : Новости теплоснабжения, 2008. 448 с.
3. Экономия тепловой энергии [Электронный ресурс]. URL: <http://www.energsovet.ru/stat208.html/>

4. Раздобреева А. С., Бирюзова Е. А. Энергосбережение в системах теплоснабжения // Современные тенденции развития науки и производства: Запад-Сибир. науч. центр, 2017. С. 334–335.

5. Xiaofang S, Peng W, Panhong R, Hua Z. The Influence of Central Regulation Methods upon Annual Heat Loss in Heating Network. MATEC Web of Conferences. 2016.

6. Бирюзова Е. А. Повышение энергоэффективности тепловых сетей за счет применения современных теплоизоляционных материалов // Региональная архитектура и строительство. 2013. № 1. С. 62–66.

7. Раздобреева А. С., Бирюзова Е. А. Энергосбережение в системах теплоснабжения // Современные тенденции развития науки и производства: Запад-Сибир. науч. центр, 2017. С. 334–335.

8. Наладка систем централизованного теплоснабжения: справочное пособие/ И. М. Сорокин, А. И. Кузнецов, Л. М. Александров, Л. А. Рогов. – М. : Стройиздат, 1979. – 436 с.

УДК 697

*Дмитрий Сергеевич Иванов,*  
аспирант  
*Антон Юрьевич Морозов,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина)  
*E-mail: dmitrij.the-end@mail.ru,*  
*anton.morozov@urfu.ru*

*Dmitriy Sergeevich Ivanov,*  
postgraduate student  
*Anton Yurievich Morozov,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Ural Federal University  
named after the first President of Russia  
B. N. Yeltsin)  
*E-mail: dmitrij.the-end@mail.ru,*  
*anton.morozov@urfu.ru*

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ МНОЖЕСТВЕННОЙ РЕГРЕССИИ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПРИТОЧНОЙ СТРУИ ВОЗДУХА

### USING LINEAR MULTIPLE REGRESSION TO PREDICT AIR JET PARAMETERS

В статье рассмотрено относительное сравнение факторов, влияющих на формирование параметров струи нагретого воздуха: скорости и температуры на оси струи. Построены регрессионные зависимости для этих параметров, проведен их анализ. Установлено наибольшее влияние фактора размера воздуховыпускного отверстия.

*Ключевые слова:* корректирующий коэффициент, воздушное отопление, струя, воздухораспределитель, параметры воздушной струи.

The article considers the comparison of air flow parameters at the calculated point when entering the working area with and without the use of correction factors. The adequacy of the model application using correction factors is verified. The results of the comparison of calculations of supply air flows are analyzed. Conclusions are made on the application of the research results.

*Keywords:* correction factor, air heating, jet, air distributor, air jet parameters.

Наиболее распространенным способом отопления производственных помещений для обеспечения теплового режима рабочей зоны является воздушное отопление путем подачи нагретого воздуха в рабочую зону. Некорректное решение этой инженерной задачи и ее реализация влечет за собой необоснованное увеличение капитальных и эксплуатационных затрат. В связи с этим правильный

расчет основных параметров для данных систем является актуальной задачей.

К настоящему моменту уже проведены фундаментальные работы в исследовании этой области научного знания [1, 2, 3], разработаны методики расчета [4], а также проводится постоянная работа по уточнению существующих зависимостей [5, 6].

Выбор начальных параметров истечения нагретого воздуха в системах воздушного отопления является многофакторной задачей. С одной стороны, необходимо обеспечить эффективное развитие дальнобойных неизотермических струй, «невсплывающих» под действием архимедовых сил, с другой стороны – необходимо обеспечить нормативные параметры микроклимата в рабочей зоне [4].

Для уменьшения области поиска оптимальных начальных параметров авторами предлагается использовать линейную множественную регрессию. В статье приведен анализ линейной множественной регрессии, полученной на основе 32 расчетов приточной струи с фиксированным начальным расходом  $L_0 = 1580 \text{ м}^3/\text{ч}$  по методике [3]. В качестве критериев оптимизации рассматривались избыточная температура на оси струи,  $\Delta t_x$ , °С и скорость воздуха  $V_x$ , м/с при входе в рабочую зону высотой 2 метра от уровня пола. Факторы и их уровни, влияющие на развитие струи приведены в табл. 1.

Таблица 1

## Исходные данные для расчета

Параметр	Диапазон
Скоростной коэффициент ВР* m	4,5–9,0
Угол подачи воздушной струи $\alpha$ , ° к горизонту	15–60
Диаметр ВР* $d$ , м	0,1–0,35
Разница температур подаваемого воздуха и в рабочей зоне $\Delta t_x$ , °С	10–40
Высота расположения ВР* $h$ над полом, м	3–10

\*ВР – воздухораспределитель

Предварительная оценка показала, что соотношение между скоростным и температурным коэффициентами  $m$  к  $n$  изменяется в диапазоне 1,17–1,19. Поэтому для расчетов принимали  $n = 1,18m$ .

Траектории и границы струй определены при помощи программы [7]. Результаты расчетов сортировались: в рассмотрение попадали струи, которые частично (рис. 1) или полностью (рис. 2) заходят в область рабочей зоны.

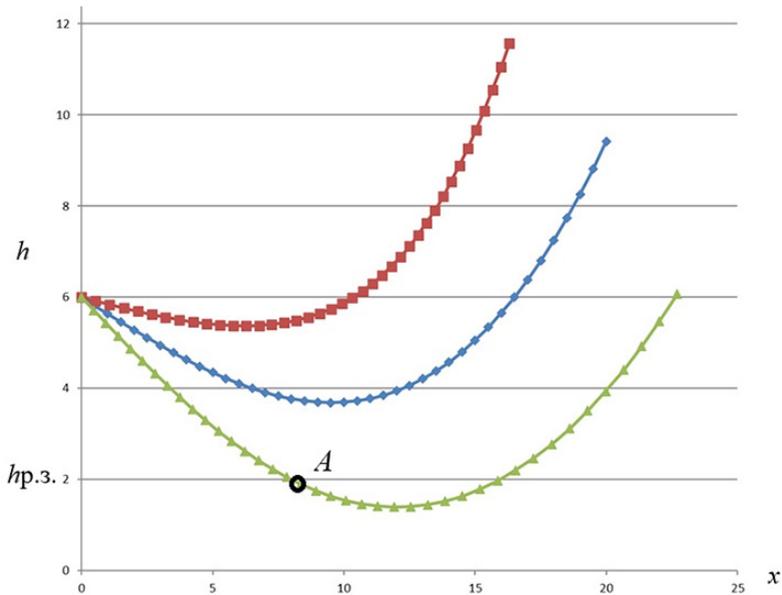


Рис. 1. Струя, частично заходящая в рабочую зону:  
 $h_{р.з.} = 2$  м – верхняя граница рабочей зоны; А – контрольная точка

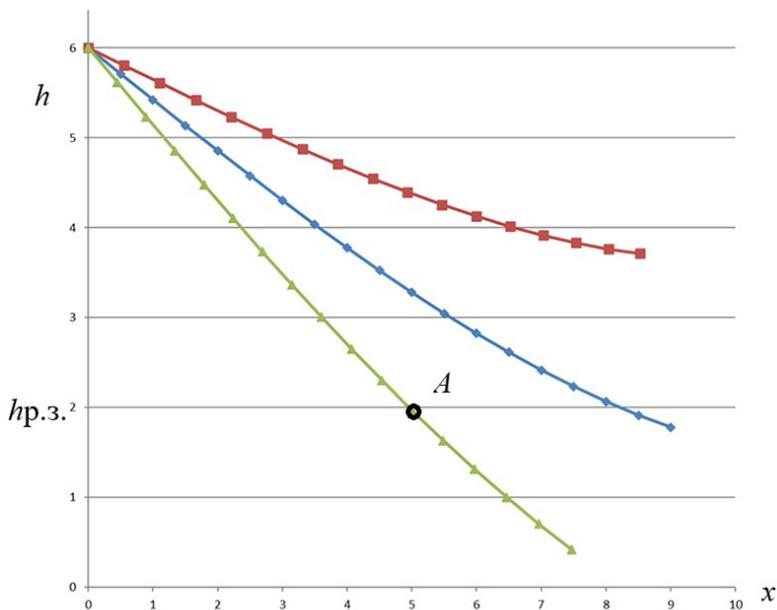


Рис. 2. Струя, полностью заходящая в рабочую зону:  
 $h_{p.z.} = 2$  м – верхняя граница рабочей зоны; А – контрольная точка

Струи, которые «всплывают» под действием архимедовых сил и не попадают нижней границей струи или ее осью в область рабочей зоны не рассматривались. Пример такой струи приведен далее (рис. 3).

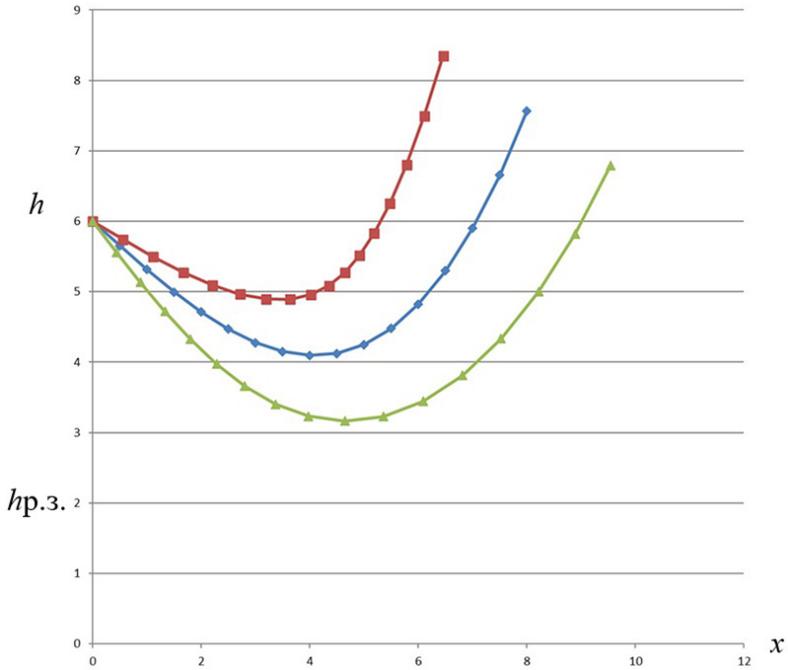


Рис. 3. Струя, не попадающая в рабочую зону:  
 $h_{р.з.} = 2$  м – верхняя граница рабочей зоны

По каждому фактору (табл. 1) были рассчитаны коэффициенты линейной регрессии отдельно для разницы определения температуры  $\Delta t_x$ , °С и скорости воздуха  $V_x$ , м/с в расчетной точке при входе в рабочую зону. Результаты представлены в табл. 2.

Таблица 2

## Коэффициенты параметров

Параметр	Коэффициент	
	$V_x$	$\Delta t_x$
Скоростной коэффициент ВР $m$	0,23	-0,15
Диаметр ВР $d$ , м*	-24,87	-102,23
Угол подачи воздушной струи $\alpha$ , °	0,14	0,9
Разница температур подаваемого воздуха и в рабочей зоне $\Delta t\theta$ , °С	-0,1	0,24
Высота расположения ВР $h$ над полом, м*	-0,79	-1,28
Константа	7,96	15,42

Уравнения регрессии имеют вид:

$$V_x = 7,96 + 0,23m - 0,79h + 0,14\alpha - 24,87d_0 - 0,1\Delta t_x \quad (1.1)$$

$$\Delta t_x = 15,42 - 0,15m - 1,28h + 0,9\alpha - 102,23d_0 + 0,24\Delta t_x \quad (1.2)$$

Как видно, размер ВР (фактор  $d$ ) оказывает наибольшее влияние на формирование величин скорости воздуха и разницы температур на оси струи.

Чтобы удостовериться в адекватности полученной модели, проведена проверка с помощью критерия Фишера (табл. 3).

Таблица 3

## Проверка адекватности регрессии по критерию Фишера

Параметр	Значение для $V_x$	Значение для $\Delta t_x$
Количество изменяемых переменных $m$	5	5
Количество экспериментов $n$	32	32
Табличное значение критерия Фишера $F_{\text{табл.}}$	0,10601	0,10601
Расчетное значение критерия Фишера $F_{\text{расч.}}$	11,64	34,39

Критерий Фишера при погрешности в 1 % в обоих случаях больше табличного. Полученная регрессия адекватна.

Для поиска оптимальных значений факторов (табл. 1) был выполнен расчет крутого восхождения по методу Бокса Уилсона. За основной уровень (начало восхождения) принималась величина – среднее арифметическое между верхним и нижними уровнями факторов. Параметры микроклимата будут удовлетворять нормам при минимальных значениях  $V_x$  и  $\Delta t_x$ .

Результаты приведены в табл. 4.

Таблица 4

#### Проверка влияния коэффициентов

Критерий	Значение критерия	$m$	$h$	$\alpha$	$d$	$\Delta t_0$
$V_x$	0,16	6,68	6,25	37,45	0,29	24,97
$\Delta t_x$	14,49	6,76	6,37	37,41	0,31	25,02
$\Delta t_x$	0,29	6,79	6,20	37,29	0,45	25,06

Результаты расчета крутого восхождения для поиска оптимальной комбинации факторов показывают: из-за наибольшего влияния фактора размера  $d$  отверстия для выпуска воздуха влияние остальных факторов относительно незначительно. Наименьшие значения  $V_x$  и  $\Delta t_x$  можно получить увеличением размера  $d$ .

Выводы по исследованию:

1. Использование линейной регрессии позволяет упростить подбор начальных параметров при расчете систем воздушного отопления путем выявления наиболее значимых факторов.
2. Расчетом установлено, что наибольшее влияние на параметры на оси струи (скорость и температуру) влияет размер воздуховыпускного отверстия.
3. Для подтверждения полученных расчетом результатов требуется дополнительно провести натурный эксперимент.

### Литература

1. *Шепелев И. А.* Аэродинамика воздушных потоков в помещении. Москва. Стройиздат, 1978. 146 с.
2. *Гримитлин М. И.* Распределение воздуха в помещениях. Санкт-Петербург. АВОК Северо-Запад, 2004. 337 с.
3. *Шумилов Р. Н.* Проектирование систем вентиляции и отопления. Санкт-Петербург. Лань, 2022. 336 с.
4. СП 60.13330.2020. Свод правил. Отопление, вентиляция и кондиционирование воздуха. СНиП 41-01-2003.
5. *Кочарьянц К. В.* Экспериментальные исследования неизотермической воздушной струи // Известия КГАСУ. 2024. № 2 (68). С. 6–16.
6. *Иванов Д. С., Морозов А. Ю.* // Современные технологии в инженерных системах и городском хозяйстве 2024. Санкт-Петербург. С. 491–496.
7. *Иванов Д. С., Аладин В. В., Морозов А. Ю.* Программа расчета траектории и параметров воздушной приточной струи // Федеральный институт промышленной собственности. Заявка № 2024686054; Заявл. 31.10.24; Опубл. 14.11.24. URL: <https://fips.ru/EGD/4ec50abe-6970-4197-9f63-70e4ce43c5b3> (дата обращения: 04.03.2025).

**УДК 614.84**

*Анастасия Леонидовна Носкова,*  
аспирант  
*Антон Юрьевич Морозов,*  
канд. техн. наук, доцент  
(Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина)  
*E-mail: a.noskova98@yandex.ru,*  
*anton.morozov@urfu.ru*

*Anastasiya Leonidovna Noskova,*  
postgraduate student  
*Anton Yurievich Morozov,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
(Ural Federal University  
named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin)  
*E-mail: a.noskova98@yandex.ru,*  
*anton.morozov@urfu.ru*

## **ЛОКАЛИЗАЦИЯ И ПРЕДОТВРАЩЕНИЕ РАЗВИТИЯ ПОЖАРА НА СКЛАДСКИХ КОМПЛЕКСАХ С ВЫСОТНЫМ СТЕЛЛАЖНЫМ ХРАНЕНИЕМ**

### **LOCALIZATION AND PREVENTION OF FIRE DEVELOPMENT IN WAREHOUSE COMPLEXES WITH HIGH-RISE SHELVING**

Данная статья посвящена основным проблемам и особенностям обеспечения противодымной защиты на складских комплексах с высотным стеллажным хранением.

*Ключевые слова:* противодымная защита, противодымная вентиляция, складские комплексы, высотное стеллажное хранение.

This article is devoted to the main problems and features of providing smoke protection in warehouse complexes with high-rise shelving.

*Keywords:* smoke protection, smoke ventilation, warehouse complexes, high-rise shelving.

За последние 10 лет, по причине того, что логистика стала одним из важных элементов инфраструктуры товарных рынков, кардинально изменилось представление о складах. Ранее склады воспринимались просто как хранилища товаров, а в настоящее время – это высокотехнологичные комплексы со сложной структурой и организацией работы.

Поскольку склады содержат значительные объемы товаров и часто работают круглосуточно, обеспечение безопасности персонала

и сохранности имущества является критически важной задачей. Эта сложность порождает вызовы в обеспечении пожарной безопасности. Противодымная защита (далее ПДЗ) стала одним из ключевых элементов проектирования и эксплуатации современных складских комплексов (рис. 1).

ПДЗ на складских комплексах играет основополагающую роль в обеспечении сохранности материальных ценностей (имущества), жизни и здоровья персонала при пожаре [1].

Под ПДЗ подразумевается комплекс организационных мероприятий и технических средств, направленных на предотвращение воздействия на людей дыма, повышенной температуры и токсичных продуктов горения [2].

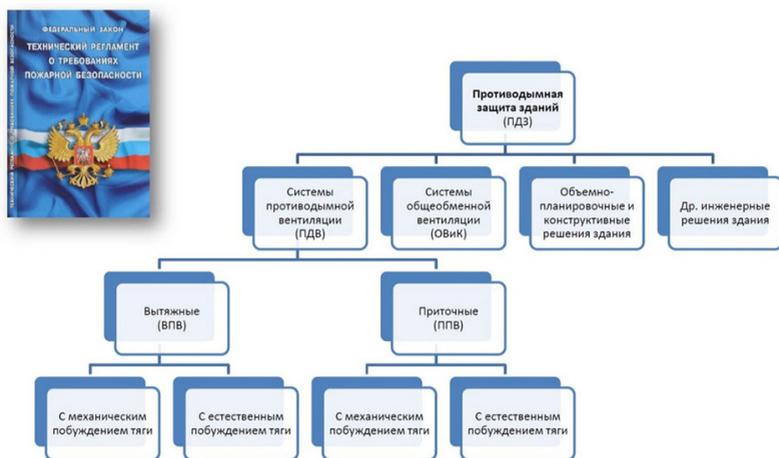


Рис. 1. Структурная схема «Принципа построения систем ПДЗ объектов капитального строительства» [3]

В современной логистике существует широкий спектр складских сооружений, предназначенных для обеспечения деятельности предприятий [4 – 15]. Вопрос классификации объектов складского хранения в России достаточно подробно рассмотрен в работе [5].

Согласно этой классификации, склады подразделяются на:  
– Открытые (площадки, платформы);

- Полузакрытые (навесы);
- Закрытые (отапливаемые и неотапливаемые помещения).

Способы размещения товаров на складах также разнообразны [5]:

- Штабельный (для продовольственных и непродовольственных товаров, упакованных в мешки, кипы, кули, ящики, бочки);
- Стеллажный (для распакованных товаров, а также товаров во внешней таре, укладываемых на стеллажи различными способами).

Стеллажное хранение получило более широкое распространение. Оно наиболее эффективно для товаров и ценностей, размещенных на поддонах, так как позволяет использовать подъемно – транспортные механизмы и обеспечивает удобный оперативный учет.

При неизменной площади склада его емкость можно увеличить за счет повышения высоты стеллажей. Такой способ хранения называется высотным стеллажным хранением (далее ВСХ) и предполагает высоту складирования свыше 5,5 м [16]. При ВСХ товар обычно располагается на многоярусных стеллажах плотными рядами.

Учитывая повышенную пожарную нагрузку на единицу площади при ВСХ, своевременное обнаружение возгорания имеет критически важное значение для минимизации ущерба.

При обеспечении пожарной безопасности склада имеет значение его специализация – какие именно материальные ценности размещены на хранение, какими свойствами в части пожароопасности они обладают. Для определения допустимости хранения в помещениях веществ или материальных ценностей нужно учитывать степень огнестойкости здания, а также классы конструктивной и функциональной пожарной опасности.

Степень огнестойкости здания определяется огнестойкостью строительных конструкций, класс конструктивной пожарной опасности – степенью участия строительных конструкций в развитии пожара, образовании его опасных факторов, а класс функциональной опасности – их назначением и особенностями применяемых технологических процессов. Складские помещения относятся к классу Ф5.2 [17].

МЧС России приводит [10] следующие данные о наиболее вероятных причинах возникновения пожара в складах (рис. 2):

- Проявление теплового эффекта короткого замыкания при нарушении изоляции электрокабелей, электропроводов и других

токоведущих элементов электрооборудования и электроосветительных приборов;

– Проявление теплового эффекта иных, отличных от короткого замыкания, аварийных режимов работы электросетей, электрооборудования и электроосветительных приборов, сопровождающиеся нагревом поверхностей и иных элементов выше температуры возгорания сгораемых веществ, находящихся в соответствующих помещениях;

– Несоблюдение правил пожарной безопасности при проведении пожароопасных работ во время строительства или эксплуатации склада;

– Неосторожность при обращении с огнем, в том числе при курении в неустановленных для этой цели местах.

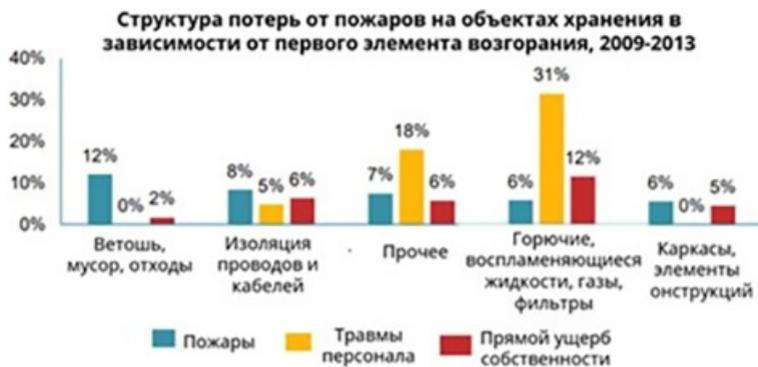


Рис. 2. Типы и причины пожаров на объектах складского хранения

Пожароопасность на складах представляет собой серьезную проблему, усугубляемую рядом специфических факторов, которые значительно затрудняют как профилактику, так обнаружение и тушение пожаров [10]:

– Высокая пожарная нагрузка (МДж/м<sup>2</sup>). На единице складского пространства сосредоточено огромное количество горючих материалов, способных высвободить колоссальное количество энергии при возгорании.

– В результате, пожар развивается с невероятной скоростью, распространяясь как по горизонтали, охватывая обширные площади склада, так и по вертикали, быстро переходя на верхние этажи.

– Масштабы самих складских комплексов значительно усложняют ситуацию. Огромные объемы воздуха внутри зданий, свойственные крупным складам, приводят к тому, что дым от пожара, особенно на начальных стадиях, практически незаметен. Дым, имеющий температуру, близкую к комнатной, равномерно распределяется в пространстве, делая его обнаружение крайне затруднительным.

– Ситуация усложняется наличием множества ворот и дверей, активное использование которых создает мощные воздушные потоки. Эта циркуляция, с одной стороны, ускоряет распространение пожара, подпитывая его кислородом и распространяя пламя, а с другой – еще больше затрудняет обнаружение зарождающегося возгорания, разбавляя и рассеивая дым.

– Многоуровневая структура современных складов, часто достигающих высоты более 10 метров, влияет на поведение дыма и горячего воздуха. Дымовые потоки, поднимаясь вверх под действием тепловой конвекции, распространяются по вертикали, создавая слоистую структуру. Это явление негативно сказывается на работе пожарных извещателей, расположенных, как правило, в верхней части помещений, так как дым может достигать их с задержкой, заметно замедляя обнаружение пожара.

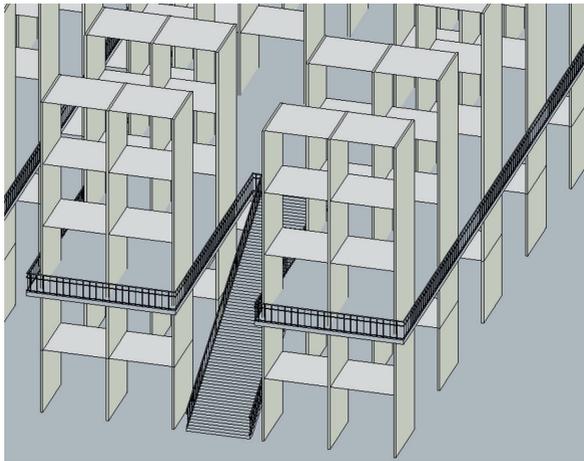


Рис. 3. Стеллаж высотный мезонинный складской

– В свою очередь, высокие стеллажи и многоуровневость создают идеальные условия для возникновения скрытых, тлеющих пожаров. Эти очаги возгорания, зачастую расположенные в труднодоступных местах среди грузов, крайне сложно обнаружить на ранней стадии, что приводит к значительному увеличению масштабов пожара к моменту его обнаружения.

– Необходимо также отметить присутствие рабочих мест непосредственно на территории складских комплексов. Это могут быть как стационарные рабочие места, так и временные, расположенные, например, на открытых мезонинах или антресолях на значительной высоте над уровнем пола (рис. 3). Наличие людей на территории склада в момент возникновения пожара значительно увеличивает риски для жизни и здоровья, усложняя эвакуацию и увеличивая время реакции на чрезвычайную ситуацию.

В совокупности, все эти факторы – высокая пожарная нагрузка, значительные объемы пространства, интенсивная циркуляция воздуха, сложная многоуровневая структура и скрытые очаги возгорания – создают чрезвычайно сложную и опасную обстановку, требующую применения специальных мер предотвращения и тушения пожаров в складских помещениях. Проведение регулярных проверок пожарной безопасности, установка современных систем обнаружения и пожаротушения, а также тщательное обучение персонала являются необходимыми условиями для минимизации рисков.

В последние годы разработаны и утверждены нормативные документы, отражающие современное состояние ПДЗ зданий и помещений (в том числе складских комплексов) [1, 18, 19].

Основная направленность при проведении расчетов предусматривает удаление продуктов горения при условии, если время заполнения дымом помещений не превышает времени, необходимого для безопасной эвакуации людей.

Для этого, предварительно, выполняется расчет пожарного риска при моделировании динамики опасных факторов пожара (далее ОФП). Инженеры пожарной безопасности пытаются доказать, что люди покинут горящее здание (в том числе и самые верхние ярусы (мезонины и антресоли)) быстрее, чем дым опустится до них, и, таким образом, пытаются уменьшить высоту незадымляемой зоны (далее НЗ)).

Не принимается в расчет тот факт, что верхняя отметка хранящейся на складских комплексах продукции (от уровня пола до верхней кромки размещения товара) должна быть принята при расчете ПДВ высотой НЗ (непосредственного упоминания об этом в нормативно – технической документации (далее НТД) нет). При этом, согласно [1] «Противодымную вентиляцию следует предусматривать для предотвращения поражающего воздействия на людей и (или) материальные ценности продуктов горения, распространяющихся во внутреннем объеме здания при возникновении пожара в одном помещении на одном из этажей одного пожарного отсека».

На практике же:

- Для безопасной эвакуации высота НЗ должна быть не ниже отметки на самом высоком участке, где возможно пребывание людей;
- Верхняя отметка хранящейся на складских комплексах продукции от уровня пола должна быть принята высотой НЗ.

В настоящее время, основой формирующегося гибкого объектно – ориентированного противопожарного нормирования при решении многих задач пожарной безопасности в строительстве, в том числе вопросов обоснования и разработки объемно – планировочных решений зданий, сооружений для обеспечения безопасной эвакуации людей при пожаре, вопросов устройства ПДВ, является математическое моделирование пожара.

Таким образом, к недостаткам нормирования систем ПДВ можно отнести отсутствие простых инженерных аналитических решений, позволяющих без расчета на ЭВМ в зависимости от состояния газовой среды в помещении определить исходные данные для расчета ПДВ, динамику ОФП в помещении с очагом возгорания, критическую продолжительность пожара (далее КПП), а, следовательно, обосновать объемно – планировочные решения зданий, сооружений с учетом безопасной эвакуации людей при пожаре. Из всего изложенного и вытекает актуальность рассматриваемой темы.

#### **Литература**

1. СП 7.13130.2013. Отопление, вентиляция и кондиционирование. Требования пожарной безопасности.
2. ГОСТ 12.1.033-81. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Термины и определения (с Изменением № 1).

3. Доклад «Принципы построения систем противодымной защиты объектов капитального строительства». Докладчик: Колчев Б. Б., заместитель начальника отдела – начальник сектора НИЦ НТП ПБ ФГБУ ВНИИПО МЧС России.
4. Классификация складов и логистических центров. Компания СКЛАД-СЕРВИС.
5. Обзор классификаций объектов складской недвижимости Вязунова Надежда Борисовна, Цуриков Сергей Витальевич.
6. Трансформация рынка складов вызвана развитием технологий и переменами в потреблении. Газета «Ведомости», 11 ноября 2019.
7. Противопожарные решения для складов и логистических центров ООО «ВАГНЕР РУ».
8. High challenge: High-piled storage fire protection– Part 2. International Fire Protection.
9. Structure Fires in Warehouse Properties. National Fire Protection Association.
10. Проблемы обеспечения противопожарной защиты складов с высотным стеллажным хранением, Н. А. Орлова. ФГБОУ ВО Сибирская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России. Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций.
11. СП 485.1311500.2020. Системы противопожарной защиты. Установки пожаротушения автоматические. Нормы и правила проектирования.
12. Пожарная безопасность складов. Ю. Полярин, к. т. н., ведущий научный сотрудник ФГУ НИИПХ, Журнал «Склад и Техника».
13. Пожарная безопасность складов : справочник / под ред. техн. наук, проф. Собура С. В. – 5-е изд., с изм. – М. : ПожКнига, 2014. – 144 с., пл. – Библиотека нормативно-технического работника.
14. НПБ 88-2001. Установки пожаротушения и сигнализации. Нормы и правила проектирования.
15. Кузнецов К. О. Оптимизация принципов размещения пожарных извещателей при защите помещений высокостеллажного складирования. «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого». Институт военно-технического образования и безопасности. Магистерская диссертация.
16. СП 4.13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.
17. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности».
18. МР к СП 7.13130.2013. Расчетное определение основных параметров противодымной вентиляции зданий.
19. СП 241.1311500.2015. Установки водяного пожаротушения высотных стеллажных складов автоматические.

УДК 697.92:727

*Денис Сергеевич Симонов,*  
аспирант, ст. преподаватель  
*Антон Юрьевич Морозов,*  
канд. техн. наук, доцент  
*Владимир Вячеславович Бесов,*  
зав. лабораторией  
(Уральский федеральный университет  
имени первого Президента России  
Б. Н. Ельцина)  
*E-mail: d.s.simonov@urfu.ru,*  
*anton.morozov@urfu.ru,*  
*v.v.besov@urfu.ru*

*Denis Sergeevich Simonov,*  
postgraduate student, senior lecturer  
*Anton Yuriyevich Morozov,*  
PhD in Sci. Tech., Associate Professor  
*Vladimir Vyacheslavovich Besov,*  
Head of the laboratory  
(Ural Federal University  
named after the first President  
of Russia B. N. Yeltsin)  
*E-mail: d.s.simonov@urfu.ru,*  
*anton.morozov@urfu.ru,*  
*v.v.besov@urfu.ru*

## ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ВОЗДУХА И МИКРОКЛИМАТА В УЧЕБНЫХ КАБИНЕТАХ ШКОЛЫ

### RESEARCH OF AIR QUALITY AND MICROCLIMATE IN SCHOOL CLASSROOMS

За последние 25 лет увеличилось число работ в области внутренней среды учебных кабинетов. В настоящем исследовании проведен мониторинг качества воздуха и параметров микроклимата в четырех учебных кабинетах школы в городе Екатеринбурге. В течение одного учебного дня с интервалом в 20 сек. проводились измерения концентрации углекислого газа, температуры и относительной влажности воздуха. Средние за день концентрации углекислого газа составили от 852 ppm до 1792 ppm. Высокое качество воздуха было зафиксировано в течение 45 % времени в кабинете с постоянно открытыми окнами. При других режимах открывания окон качество воздуха было ниже. Максимальное изменение температуры воздуха в течение учебного дня составило 5,3 °C (от 22,4 °C до 27,7 °C). Относительная влажность была в диапазоне от 12 % до 45 %. Для улучшения качества воздуха и теплового комфорта можно рекомендовать применение приточно-вытяжных механических систем вентиляции.

*Ключевые слова:* вентиляция, качество воздуха, микроклимат, относительная влажность, температура, углекислый газ, учебный кабинет.

Over the past 25 years, the number of studies in the field of the indoor environment of classrooms has increased. In this study, air quality and microclimate parameters were monitored in four classrooms of a school in Yekaterinburg. Carbon

dioxide concentration, temperature, and relative humidity were measured at 20-second intervals during one school day. Average daily carbon dioxide concentrations ranged from 852 ppm to 1792 ppm. High air quality was recorded for 45% of the time in a classroom with constantly open windows. Air quality was lower with other window opening modes. The maximum change in air temperature was 5.3 °C (from 22.4 °C to 27.7 °C). Relative humidity ranged from 12% to 45%. Mechanical ventilation systems can be recommended to improve air quality and thermal comfort.

*Keywords:* ventilation, air quality, microclimate, relative humidity, temperature, carbon dioxide, classroom.

## **Введение**

За последние 25 лет в журналах, входящих в такие академические базы данных как Web of Science, Scopus, Science Direct, увеличилось число работ, посвященных вопросам внутренней среды в учебных кабинетах образовательных организаций [1]. Большая часть работ приходится на США, Китай, Канаду, Австралию, Бразилию и страны Европейского союза [1].

Исследования [2, 3, 4, 5] показывают, что качество воздуха, величина воздухообмена и температура оказывают влияние как на успешность обучения, так и на количество занятий, пропущенных по причине заболеваний, передающихся воздушно-капельным путем. При этом снижение успеваемости и увеличение числа пропущенных занятий оказывает отрицательное влияние и на социально-экономическую сферу государства [6].

Однако, согласно результатам исследований состояния воздушной среды [7, 8, 9], во многих случаях качество воздуха, оцениваемое с использованием углекислого газа (далее CO<sub>2</sub>) в качестве индикатора, и температура в учебных кабинетах не соответствуют требуемым. Стоит отметить, что число аналогичных работ [10, 11] в России невелико [1].

Исследования и последующая разработка мероприятий по обеспечению требуемого качества воздушной среды в учебных кабинетах являются актуальной задачей.

Цель настоящей работы – исследовать текущее качество воздуха и параметры микроклимата в учебных кабинетах школы.

### Материалы и методы

Исследование проводилось 12 февраля 2025 г. в четырех учебных кабинетах школы в городе Екатеринбурге. Характеристика кабинетов приведена в таблице 1.

Таблица 1

#### Характеристики учебных кабинетов

Номер кабинета	Площадь, м <sup>2</sup>	Высота, м	Объем, м <sup>3</sup>	Тип систем вентиляции
К1	68,4	2,95	201,8	Естественная (открытие окон, один вытяжной канал)
К2	58,5	2,95	172,6	
К3	50,0	2,95	147,5	
К4	48,8	2,95	144,0	

Режим открывания окон и нахождения учащихся в учебных кабинетах определялся учителями самостоятельно.

В день исследования температура наружного воздуха изменялась в диапазоне от  $-3,2$  °С до  $-9,0$  °С, скорость ветра составляла 6–7 м/с при западном направлении [12].

Для измерения уровня  $\text{CO}_2$ , относительной влажности и температуры внутреннего воздуха использовались измерители качества воздуха ИКВ-8 П (зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации под номером 84997-22, поверка выполнена в декабре 2024 г.).

Пределы допускаемой основной абсолютной погрешности средств измерения составляют: при измерении температуры воздуха  $\pm 0,2$  °С, при измерении относительной влажности воздуха  $\pm 2$  %, при измерении концентрации  $\text{CO}_2 \pm (30 + 0,03\text{Свх})$  ppm (Свх – объемная доля  $\text{CO}_2$  на входе измерителя, ppm).

Время прогрева измерителя качества воздуха после включения не превышает 300 сек. Измерения производились в течение одного учебного дня с интервалом 20 сек.

В каждом кабинете было установлено по одному средству измерения на внутренней стене на высоте около 1,5 м (места размещения

выбирались исходя из условия обеспечения наименьшего взаимодействия учащихся и средств измерения).

Результаты измерений сравнивались с нормативными требованиями к качеству воздуха и параметрам микроклимата. Классификация качества воздуха (таблица 2) принята согласно [13] при среднегодовой концентрации  $\text{CO}_2$  в наружном воздухе большого города 400 ppm, а допустимые величины параметров микроклимата (таблица 3) согласно [14].

Таблица 2

### Классификация качества воздуха

Качество воздуха в помещении	Содержание $\text{CO}_2$ , ppm
Высокое	800 и менее
Среднее	800–1000
Допустимое	1000–1400
Низкое	1400 и более

Таблица 3

### Допустимые величины параметров микроклимата

Назначение помещения	Температура воздуха, °C	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Учебный кабинет	20–24	40–60	0,1

### Результаты и обсуждения

Режим использования учебных кабинетов и открывания окон в день исследования приведен в табл. 4. Необходимо отметить, что в кабинетах К2 и К3 окна были открыты во время занятий, что не обеспечивает выполнение требований нормативной документации [14], исключающей возможность проветривания учебных кабинетов в присутствии учащихся.

Таблица 4

## Режим использования учебных кабинетов

Параметр	Кабинет К1	Кабинет К2	Кабинет К3	Кабинет К4
Режим открывания окон	Открывание окон на переменах, могут быть открыты двери во время занятий	Одно окно открыто в течение всего дня, дети на переменах не покидают кабинет	Несколько окон открыты в течение всего дня	Кратковременное открывание окон на переменах
1-я смена				
Количество занятий	5	5	5	5
Количество учащихся	27	28	10-16	16-27
Возраст учащихся	10-11 лет	8-9 лет	16-17 лет	14-17 лет
2-я смена				
Количество занятий	5	5	4	4
Количество учащихся	24	22	6-23	18-25
Возраст учащихся	9-10 лет	10-11 лет	13-18 лет	13 лет

Наиболее эффективное проветривание помещений было обеспечено в кабинете К3 (рис. 1). Средний уровень  $\text{CO}_2$  составил: К1 – 1792 ppm, К2 – 1607 ppm, К3 – 852 ppm, К4 – 1401 ppm.

Распределение концентрации  $\text{CO}_2$  по времени (рис. 2) показывает, что в кабинетах К1, К2, К4 на протяжении более 50 % учебного времени качество воздуха оставалось на низком уровне. Отдельно стоит отметить, что в кабинете К1 уже на момент начала занятий концентрация  $\text{CO}_2$  составляла 1139 ppm. Максимальный период времени при высоком качестве воздуха наблюдался в кабинете К3 и составил 45 % от продолжительности учебного дня.

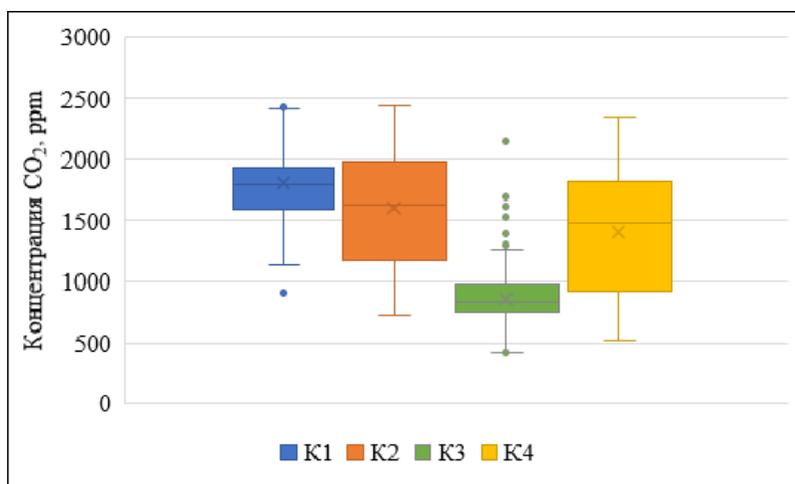


Рис. 1. Концентрации  $\text{CO}_2$  в учебных кабинетах

Тепловой режим (рис. 3) в кабинетах К3 и К4 был неудовлетворительным при максимальной температуре 25,3 °С и 27,7 °С соответственно (без учета выбросов). Максимальное изменение температуры воздуха в течение дня было зафиксировано в кабинете К4 и составило 5,3 °С. Несмотря на то, что в кабинетах К1 и К2 на протяжении всего учебного дня температура воздуха в точке измерения соответствовала допустимому диапазону (рис. 4), необходимо так-

же учитывать неравномерность распределения температуры по объему помещений [15], особенно вблизи открытых окон.

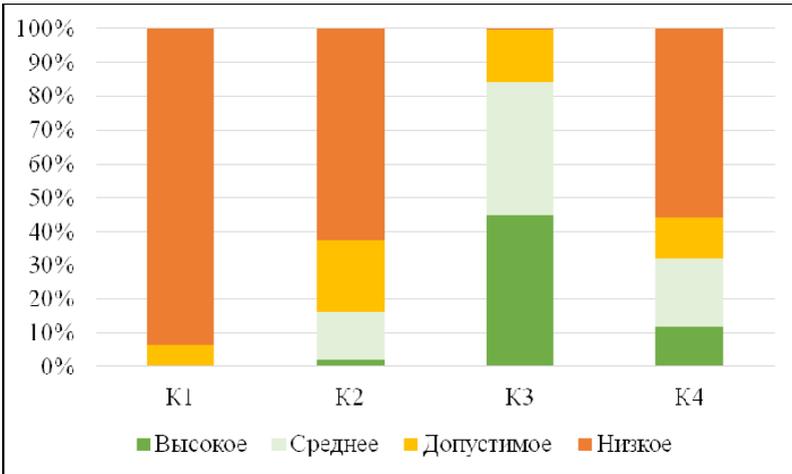


Рис. 2. Распределение концентрации CO<sub>2</sub> по времени в соответствии с различными категориями качества воздуха

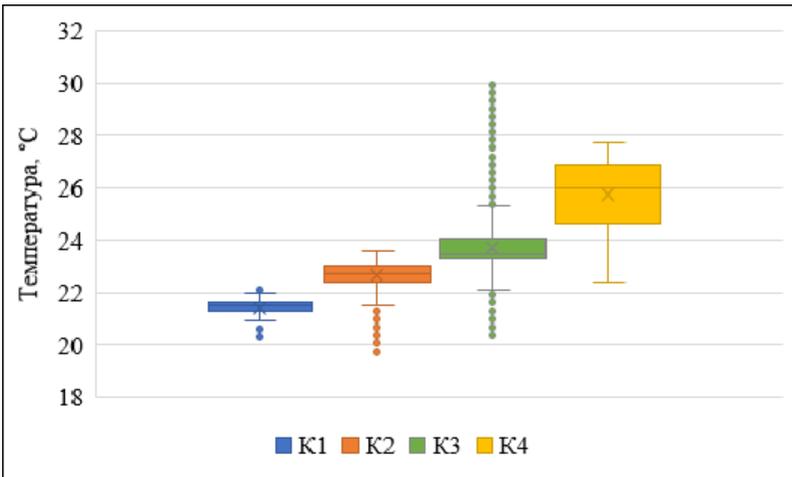


Рис. 3. Температура в учебных кабинетах

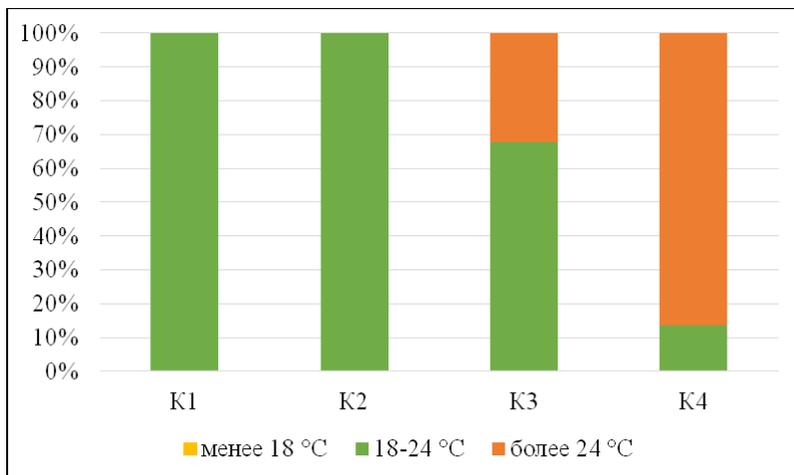


Рис. 4. Распределение температуры по времени

Результаты измерений (рис. 5) показывают, что только в кабинете К1 была зафиксирована допустимая относительная влажность воздуха (средняя 41 %), что обусловлено накоплением влаги, выделяемой учащимися и учителями. В остальных кабинетах величина относительной влажности была ниже допустимой на протяжении всего учебного дня (рис. 6). В кабинете К3 величина относительной влажности была наименьшей (средняя 17 %), что можно объяснить наибольшей величиной воздухообмена.

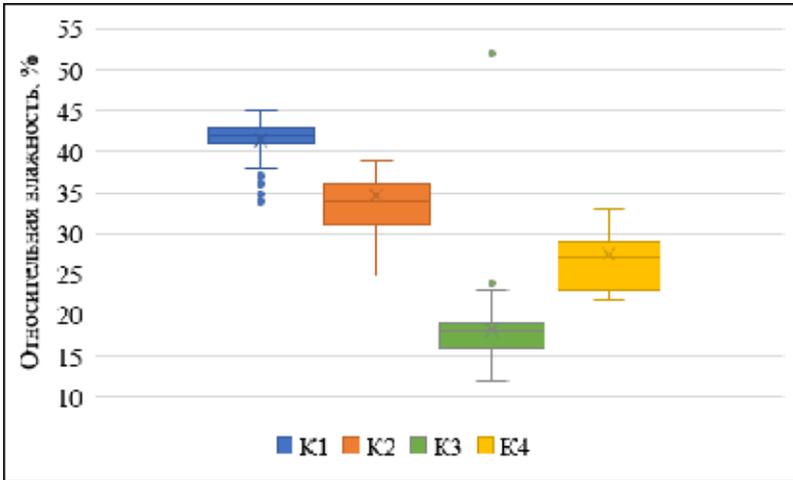


Рис. 5. Относительная влажность в учебных кабинетах

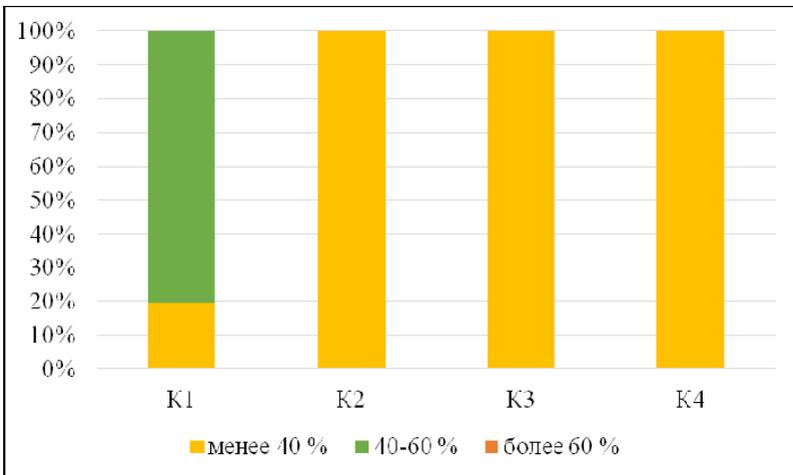


Рис. 6. Распределение относительной влажности по времени

Результаты настоящей работы ограничены, поскольку исследование проводилось только в холодный период года и без мониторинга

концентрации CO<sub>2</sub> в наружном воздухе. Измерения выполнялись в течение одного учебного дня и, следовательно, не все возможные варианты занятости и режимов вентиляции включены в исследование. Кроме того, для помещений с естественным проветриванием наружным воздухом характерна неравномерность распределения по объему температуры, концентрации CO<sub>2</sub> и относительной влажности [15], что в настоящей работе не рассматривалось.

### **Заключение**

Исследование показало, что значительное влияние на концентрацию CO<sub>2</sub> в воздухе учебных кабинетов оказывает режим открывания окон, определяемый учителями. Однако, даже в случае одного постоянного открытого окна (кабинет К2) величины воздухообмена может быть недостаточно для обеспечения требуемого качества воздуха (требования [14] не допускают проветривание помещений в присутствии учащихся). При всех режимах открывания окон в течение учебного дня были зафиксированы отклонения от допустимых величин параметров микроклимата и требуемого качества воздуха.

Для улучшения качества воздуха и теплового комфорта можно рекомендовать применение приточно-вытяжных механических систем вентиляции.

### **Литература**

1. *Sadrizadeh S., Yao R.* et al. Indoor air quality and health in schools: A critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022. Vol. 57. 104908.
2. *Hviid C. A., Pedersen C., Dabelsteen K. H. A.* field study of the individual and combined effect of ventilation rate and lighting conditions on pupils' performance. *Building and Environment*. 2020. Vol. 171. 106608.
3. *Gaihre S., Semple S., Miller J., Fielding S., Turner S.* Classroom carbon dioxide concentration, school attendance, and educational attainment. *Journal of School Health*. 2014. Vol. 84. Pp. 569–574.
4. *Mendell R. J., Eliseeva E. A., Davies M. M., Lobscheid A.* Do classroom ventilation rates in California elementary schools influence standardized test scores? Results from a prospective study. *Indoor Air*. 2016. Vol. 26. Pp. 546–557.
5. *Haverinen-Shaughnessy U., Moschandreas D. J., R. J. Shaughnessy R. J.* Association between substandard classroom ventilation rates and students' academic achievement. *Indoor Air*. 2011. Vol. 21. Pp. 121–131.

6. *Wargoeki P., Wyon D. P.* Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013. Vol. 59. Pp. 581–589.

7. *Andamon M. M., Rajagopalan P., Woo J.* Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO<sub>2</sub> concentration measurements. *Building and Environment*. 2023. Vol. 5. 110313.

8. *Cabovsk'a B., Beko G., Teli D., Ekberg L.* Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*. 2022. Vol. 226. 109744.

9. *Ding E., Zhang D., Hamida A.* Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and prevention measures. *Building and Environment*. 2023. Vol. 4. 109922.

10. *Горбаткова Е. Ю., Ахмадуллина Х. М., Ахмадуллин У. З., Зулькарнаев Т. Р., Хуснутдинова З. А., Мануйлова Г. Р.* Гигиеническая оценка состава воздушной среды студенческих аудиторий. *Гигиена и санитария*. 2022. № 4. С. 453–458.

11. *Исаева Г. Ш., Зиятдинов В. Б., Габидуллина С. Н.* Гигиенический и микробиологический мониторинг воздушной среды в начальной школе. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2016. № 2. С. 83–88.

12. Архив фактической погоды ФГБУ «Гидрометцентр России». URL: <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda> (дата обращения: 02.03.2025).

13. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 02.03.2025).

14. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=656010> (дата обращения: 02.03.2025).

15. *Zhang D., Ding E., Blyussen P. M.* Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO<sub>2</sub> monitoring. *Indoor and Built Environment*. 2022. Vol. 4. Pp. 1107–1126.

## Секция «Математика»

УДК 37(091)

*Инеcса Васильевна Игнатушина,*  
д-р пед. наук, доцент  
(Оренбургский государственный  
педагогический университет)  
E-mail: streleec@yandex.ru

*Inessa Vasilyevna Ignatushina,*  
Dr. Sci. Ped., Associate Professor  
(Orenburg State  
Pedagogical University)  
E-mail: streleec@yandex.ru

### **Д. А. ГРАВЕ И ЕГО НАУЧНО-ПЕДАГОГИЧЕСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ ПО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ГЕОМЕТРИИ В ПЕТЕРБУРГЕ**

#### **D. A. GRAVE AND HIS SCIENTIFIC AND PEDAGOGICAL ACTIVITY IN DIFFERENTIAL GEOMETRY IN ST. PETERSBURG**

Дмитрий Александрович Граве известен в первую очередь как основоположник крупной алгебраической школы в нашей стране. Однако не малый интерес представляют его работы по дифференциальной геометрии. В статье описаны результаты Д. А. Граве, полученные им в указанной области математики в конце XIX в. Особое внимание уделено его докторской диссертации «Об основных задачах математической теории построения географических карт», в которой был решен целый ряд важных задач дифференциальной геометрии. Тематически она продолжала исследования Л. Эйлера, Ж. Л. Лагранжа, П. Л. Чебышева, А. Н. Коркина, А. А. Маркова и Ж. Г. Дарбу по математической картографии. Прежде всего, здесь Граве дал ответ на вопрос, поставленный Коркиным, об отыскании эквивалентных проекций поверхности шара на плоскость, при которых все меридианы и параллели изобразятся прямыми или окружностями. Другим ценным результатом Граве, изложенным в его диссертации, было доказательство теоремы Чебышева о выборе наилучшей проекции для данного участка земной поверхности. В статье приведено обобщение этого доказательства, которое Граве опубликовал позже на французском языке в работе «Обобщение доказательства одной теоремы Чебышева». Кроме того, в статье дается краткая характеристика его педагогической деятельности по преподаванию дифференциально-геометрического материала в высших учебных заведениях Петербурга.

*Ключевые слова:* дифференциальная геометрия, Дмитрий Александрович Граве, история математики и математического образования.

Dmitry Aleksandrovich Grave is known primarily as the founder of a major algebraic school in our country. However, his work on differential geometry is of no small interest. The article describes the results of D. A. Grave, obtained by him in this field of mathematics at the end of the XIX century. Special attention is paid to his doctoral dissertation “On the basic problems of the mathematical theory of constructing geographical maps”, in which a number of important problems of differential geometry were solved. Thematically, she continued the research of L. Euler, J. L. Lagrange, P. L. Chebyshev, A. N. Korkin, A. A. Markov and J. G. Darboux on mathematical cartography. First of all, here Grave gave an answer to the question posed by Korkin about finding equivalent projections of the surface of a sphere onto a plane in which all meridians and parallels are represented by straight lines or circles. Another valuable result of Grave, outlined in his dissertation, was the proof of Chebyshev’s theorem on choosing the best projection for a given area of the earth’s surface. The article presents a generalization of this proof, which Grave later published in French in his work “Generalization of the proof of Chebyshev’s theorem”. In addition, the article provides a brief description of his pedagogical activity in teaching differential geometric material in higher educational institutions of St. Petersburg.

*Keywords:* differential geometry, Dmitry Aleksandrovich Grave, history of mathematics and mathematical education.

Дмитрий Александрович Граве (1863–1939) – один из выдающихся отечественных математиков, почетный член АН СССР, академик АН УССР, основоположник крупной алгебраической школы – принадлежал к младшему поколению Петербургской математической школы XIX в. Его учителями на физико-математическом факультете Петербургского университета были видные ученые-математики того времени: П. Л. Чебышев, А. Н. Коркин, А. А. Марков, К. А. Поссе, И. Л. Пташицкий, Ю. В. Сохоцкий [1]. С самого начала своей студенческой жизни Д. А. Граве включился в научную деятельность. Он много времени проводил в библиотеке, изучая труды классиков, организовал студенческое научное общество, которое издавало свой журнал «Записки физико-математического общества С.-Петербургского университета». В нем Дмитрий Александрович опубликовал результаты своих первых научных изысканий.

Большое влияние на формирование научных интересов Граве оказал профессор А. Н. Коркин. Ежедневно на его квартире собиралась университетская молодежь и профессура Петербурга. На этих вечерах любил бывать и Граве. Позже в своих автобиографических

записках он писал: «Сидя на диване, Коркин вел интересную беседу, так как был умный и образованный человек. Особенно были интересны его разговоры о математике. Я должен признать, что обе мои диссертации вытекали из этих разговоров, хотя в докторской диссертации большую роль сыграли Чебышев и Марков» [2, с. 223].

По окончании университета в 1885 г. Граве представил выпускную работу (кандидатскую диссертацию), посвященную одному из вопросов дифференциальной геометрии, а именно наименьшим поверхностям, т.е. поверхностям, в каждой точке которых средняя кривизна равна нулю. Вся работа состояла из трех глав. В первой главе с помощью вариационного исчисления выведены условия, которым должна удовлетворять наименьшая поверхность. Во второй рассмотрены теоремы о кривизне таких поверхностей. В третьей изложено интегрирование дифференциальных уравнений наименьших поверхностей [3].

В 1889 г. Д. А. Граве защитил магистерскую диссертацию [4] по теории интегрирования дифференциальных уравнений с частными производными первого порядка и был оставлен при Петербургском университете для приготовления к профессорскому званию. В том же году он был зачислен приват-доцентом университета и, кроме того, получил должность преподавателя математики в Институте инженеров путей сообщения. С 1891 г. его приглашают читать лекции на Бестужевских высших женских курсах, а с 1893 г. – в Военно-топографическое училище. По воспоминаниям его современников, Д. А. Граве «с замечательным искусством умел излагать самые отвлеченные и трудные вопросы с редкою простотою и ясностью» [3, с. 322].

Сохранилось литографированное издание 1893 г. лекций по дифференциальному исчислению [5], которые Д. А. Граве читал в Институте инженеров путей сообщения. В последнем разделе собран материал по приложению дифференциального исчисления к геометрии. В первой части этого раздела изложены вопросы дифференциальной геометрии на плоскости. Во второй – освещаются вопросы дифференциальной геометрии в пространстве. Содержание этих лекций показывает, что вопросы дифференциальной геометрии уже стали неотъемлемой составляющей курса высшей математики технического вуза.

Следует отметить, что в Петербургском университете Граве читал специальный курс по теории поверхностей и вел практические занятия по этому курсу. Его лекции на правах вольнослушателя посещал профессор Морской академии, будущий академик, Алексей Николаевич Крылов (1863–1945). В письме от 2 декабря 1930 г. он писал: «Глубокоуважаемый Дмитрий Александрович! ... С благодарностью вспоминаю, что на днях исполняется ровно 40 лет с тех пор, как я имел удовольствие слушать в С.-Петербургском университете Ваши лекции по дифференциальной геометрии» [6, с. 33].

В 1896 г. Граве защитил докторскую диссертацию «Об основных задачах математической теории построения географических карт» [7], в которой решил целый ряд важных задач дифференциальной геометрии. Тематически она продолжала исследования Эйлера, Лагранжа, Чебышева, Коркина, Маркова и Дарбу по картографии.

Поскольку поверхность земного сфероида не развертывается на плоскость, то изобразить ее на плоскости без искажения невозможно. Существуют два основных вида проекций: конформные и эквивалентные. При конформных проекциях сохраняется подобие в бесконечно малых частях или, другими словами, сохраняется угол между любыми двумя линиями поверхности при их изображении на карте. Масштаб при таком отображении остается постоянным по всем направлениям, при переходе от одной точки к другой.

Эквивалентные проекции таковы, что все площади фигур на карте пропорциональны площадям соответствующих фигур на земной поверхности. Масштаб на карте при такой проекции меняется в каждой точке в зависимости от азимута. На карте, выполненной в эквивалентной проекции, не может быть подобия в бесконечно малых частях. Поэтому при изображении большей части земной поверхности, когда уже ощутима кривизна земли, делают выбор между указанными видами проекций.

Лагранж в работе «О построении географических карт» (1779 г.) [8] рассмотрел общую теорию конформных проекций любой поверхности вращения на плоскость. Особое внимание он уделил случаю, когда поверхность вращения есть сфера, и все ее меридианы и параллели переходят в окружности или прямые на плоскости. Еще раньше Эйлер в мемуаре «Об изображении поверхности шара

на плоскости» (1777 г.) [9] решил схожую задачу в отношении одного частного случая эквивалентных проекций, когда изображения меридианов и параллелей пересекаются под прямым углом.

В общем виде вопрос об отыскании эквивалентных проекций шара на плоскость, при которых изображения меридианов и параллелей являются прямыми или окружностями, был поставлен А. Н. Коркиным.

В своей работе Граве дал полное решение задачи Коркина, указав 11 типов единственно возможных проекций, из которых наиболее выгодными являются, по его мнению, те, при которых изображения меридианов и параллелей взаимно ортогональны.

Другим ценным результатом Граве, изложенным в диссертации, было доказательство следующей теоремы Чебышева: «Наивыгоднейшая проекция для изображения какой-нибудь части земной поверхности на карте есть та, в которой на границе изображения масштаб сохраняет одну и ту же величину, легко определяемую по принятой нормальной величине масштаба» [10, с. 242]. Это утверждение Чебышев высказал на заседании Петербургской Академии наук 18 января 1853 г., и долгое время оно оставалось без доказательства.

Первое доказательство этой теоремы Граве нашел в 1894 г. и доложил его на конгрессе французской ассоциации содействия прогрессу наук. В диссертации он представил его полнее. В 1911 г. Граве опубликовал на французском языке работу «Обобщение доказательства одной теоремы Чебышева» [11], в которой распространил свои рассуждения на произвольные поверхности, имеющие гауссову кривизну постоянного знака. Рассмотрим это доказательство подробнее.

Если линейный элемент заданной поверхности в изотермических координатах имеет вид

$$ds^2 = \lambda^2 (du^2 + dv^2),$$

то коэффициенты первой квадратичной формы

$$ds^2 = Edu^2 + 2Fdudv + Gdv^2$$

принимают значения:

$$F = 0, E = G = \lambda^2. \quad (1)$$

Поскольку всякая конформная проекция поверхности  $(u, v)$  на плоскость  $(x, y)$  задается формулой  $x + iy = f(u + iv)$ , тогда масштаб этого отображения определяется следующим образом:

$$m = \frac{|f'(u + iv)|}{\lambda}.$$

Введя обозначение  $H = \ln |f'(u + iv)| = \frac{1}{2} \ln f'(u + iv) + \frac{1}{2} \ln f'(u - iv)$ , получим  $\ln m = H - \ln \lambda$ .

Функция  $H$ , будучи действительной частью аналитической функции  $\ln f'(u + iv)$ , является гармонической функцией, поэтому она не принимает экстремальных значений во внутренних точках областей.

Схожим свойством обладает и функция  $H - \ln \lambda$ . В самом деле, если положим, что гауссова кривизна  $K$  положительна и функция  $H - \ln \lambda$  достигла своего максимума во внутренней точке некоторой области, тогда будут выполняться следующие неравенства

$$\frac{\partial^2 (H - \ln \lambda)}{\partial u^2} \leq 0, \quad \frac{\partial^2 (H - \ln \lambda)}{\partial v^2} \leq 0,$$

складывая которые, после некоторых преобразований, получим:

$$\frac{\partial^2 \ln \lambda}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \ln \lambda}{\partial v^2} \geq 0. \quad (2)$$

Гауссом в 1816 г. было доказано, что кривизна  $K$  зависит только от коэффициентов первой квадратичной формы и их производных, т. е. выполняется равенство:

$$4(EG - F^2)K = E \left( \frac{\partial E}{\partial v} \frac{\partial G}{\partial v} - 2 \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial v} + \left( \frac{\partial G}{\partial u} \right)^2 \right) + \\ + F \left( \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial v} - \frac{\partial E}{\partial v} \frac{\partial G}{\partial u} - 2 \frac{\partial E}{\partial v} \frac{\partial F}{\partial v} + 4 \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial F}{\partial v} - 2 \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial v} \right) +$$

$$+G \left( \frac{\partial E}{\partial u} \frac{\partial G}{\partial u} - 2 \frac{\partial F}{\partial u} \frac{\partial F}{\partial v} + \left( \frac{\partial E}{\partial v} \right)^2 \right) -$$

$$-2(EG - FF) \left( \frac{\partial^2 E}{\partial v^2} - 2 \frac{\partial^2 F}{\partial u \partial v} + \frac{\partial^2 G}{\partial u^2} \right).$$

Отсюда, учитывая соотношения (1) и (2), получим

$$\frac{1}{\lambda^2} K = - \left( \frac{\partial^2 \ln \lambda}{\partial u^2} + \frac{\partial^2 \ln \lambda}{\partial v^2} \right) \leq 0,$$

следовательно,  $K \leq 0$ , что противоречит предположению. Аналогично доказывается, что и в случае отрицательной гауссовой кривизны функция  $H - \ln \lambda$  не достигает своего минимума во внутренней точке некоторой области.

Далее, пусть на заданном контуре функция  $H - \ln \lambda$  равна нулю, тогда при  $K > 0$  она принимает отрицательные значения внутри контура. Требуется доказать, что амплитуда функции  $H - \ln \lambda$  т. е. разность между наибольшим и наименьшим значениями, меньше, чем у любой другой функции вида  $H_1 - \ln \lambda$ . Обозначим наибольшее значение функции  $H_1 - \ln \lambda$  через  $A$ , тогда функция  $H_2 - \ln \lambda = H_1 - \ln \lambda - A$  имеет ту же амплитуду и принимает внутри и на контуре только неположительные значения. Остается доказать, что минимум функции  $H_2 - \ln \lambda$  меньше, чем у функции  $H - \ln \lambda$ . Это следует из того, что разность

$$H - \ln \lambda - (H_2 - \ln \lambda) = H - H_2,$$

являясь гармонической функцией и принимая на контуре исключительно положительные значения, не может принимать отрицательных значений внутри контура.

В диссертации Граве решил и целый ряд частных задач картографии. Например, он сравнил отклонение масштаба в проекциях Гаусса и Чебышева и показал преимущество второй. Для этого он рассмотрел четырехугольник, ограниченный дугами параллелей  $40^\circ$  и  $70^\circ$  северной широты, и двумя меридианами, отстоящими друг от друга

на  $40^\circ$ . Это пространство охватывает всю европейскую часть России. Граве вычислил отклонение масштаба вдоль среднего меридиана через каждые  $5^\circ$ . Оказалось, что в проекции Чебышева «отклонение от нуля логарифма масштаба почти в два с половиной раза меньше, чем для Ламбертовой проекции, которая под именем Гауссовой введена при изображении Российской империи» [7, с. 3].

Научные результаты этой диссертационной работы были высоко оценены А. Н. Коркиным, который на ее защите, обращаясь к Граве, сказал: «Вы являетесь достойным учеником Эйлера. В вашей диссертации совсем нет воды, и каждая глава ее имеет вполне конкретное содержание» [2, с. 225].

В конце 90-х годов XIX в. Граве переходит в Харьковский университет, одновременно становится профессором Технологического института в Харькове, а в конце 1901 г. избирается по конкурсу профессором кафедры чистой математики Киевского университета [12]. Здесь в течение почти сорока лет продолжалась его дальнейшая научно-педагогическая деятельность. Научные исследования Д. А. Граве этого периода относятся преимущественно к алгебре и теории чисел [13]. В Киевском университете он организовал научный семинар, где особое внимание уделялось теории групп. Среди его учеников были О. Ю. Шмидт, Б. Н. Делоне, Н. Г. Чеботарев, которые стали основателями новых алгебраических школ в Москве, Ленинграде и Казани.

### Литература

1. Добровольский В. А. Дмитрий Александрович Граве. М., 1968. 112 с.
2. Автобиографические записки Д. А. Граве (Публикация А. Н. Боголюбова) // Историко-математические исследования. – М., 1993. Вып. XXXIV. – С. 219–246.
3. Добровольский В. А. Научно-педагогическая деятельность Д. А. Граве (к столетию со дня рождения) // Историко-математические исследования. М., 1963. Вып. XV. С. 319–360.
4. Граве Д. А. Об интегрировании частных дифференциальных уравнений первого порядка (магистерская диссертация). СПб., 1889. 100 с.
5. Граве Д. А. Курс дифференциального исчисления. Лекции, читанные преподавателем высшей математики в Институте инженеров путей сообщения Императора Александра I, приват-доцентом Императорского С.-Петербургского Университета Д. А. Граве. СПб., 1893. 29 с.

6. *Урбанский В. М.* Дмитрий Граве и время. Киев, 1998. 266 с.
7. *Граве Д. А.* Об основных задачах математической теории построения географических карт. СПб., 1896. 192 с.
8. *Lagrange J. L.* Sur la construction des cartes géographiques// Nouveaux Mém. de l'Acad. Royale des Sciences de Berlin, 1779. Berlin, 1781.
9. *Эйлер Л.* Об изображении поверхности шара на плоскости // Л. Эйлер. Избранные картографические статьи. М., 1959. С. 21–50.
10. *Чебышев П. Л.* Сочинения. СПб., 1899. Т.1. 714 с.
11. *Grave D. A.* Démonstration d'un théorème de Tchébychef generalise // Journal für reine und angewandte Mathematik. Berlin, 1911. Bd. 140.S. 247–251.
12. *Боголюбов А. Н., Урбанский В. М.* Дмитрий Александрович Граве и его время // Историко-математические исследования. М., 1993. Вып. XXXIV. С. 209–218.
13. *Чеботарев Н. Г.* Академик Дмитрий Александрович Граве (1863–1939) // Сборник, посвященный памяти академика Дмитрия Александровича Граве / Под ред. О. Ю. Шмидта, Б. Н. Делоне, Н. Г. Чеботарева. М. – Л., 1940. С. 3–14.

УДК 534-16

*Владислав Михайлович Овсянников,*  
д-р техн. наук, профессор  
(Российский университет транспорта)  
*E-mail: OvsyannikovVM@yandex.ru*

*Vladislav Mikhaylovich Ovsyannikov,*  
Dr. Sci. Tech., Professor  
(Russian University of Transport)  
*E-mail: OvsyannikovVM@yandex.ru*

**УРАВНЕНИЕ ДИНАМИКИ В ПЕРЕМЕЩЕНИЯХ  
ТЕОРИИ УПРУГОСТИ С ВЫСШИМИ  
ИНВАРИАНТАМИ, СОСТАВЛЕННОЕ  
ПО МАТЕРИАЛАМ АКАДЕМИКОВ Л. И. СЕДОВА  
И В. И. СМЕРНОВА**

**DYNAMIC EQUATION IN DISPLACEMENTS  
OF THE THEORY OF ELASTICITY WITH HIGHER  
INVARIANTS, COMPILED BASED ON THE MATERIALS  
OF ACADEMICIANS L. I. SEDOV AND V. I. SMIRNOV**

Вывод В. И. Смирнова уравнения динамики в перемещениях теории упругости учитывает только первый, линейный, инвариант тензора деформаций. Л. И. Седов в учебнике «Механика сплошной среды» привел выражение для коэффициента объемного расширения, который учитывает второй, квадратичный, и третий, кубичный, инварианты тензора деформаций. В этой статье выводится полное уравнение динамики в перемещениях, которое содержит первый, второй и третий инварианты тензора деформаций. Учет второго и третьего инвариантов в уравнении динамики в перемещениях позволяет более точно производить расчет генерации колебаний и вибраций в теории упругости.

*Ключевые слова:* теория упругости, уравнение динамики в перемещениях, тензор деформаций, генерация волн.

V.I. Smirnov's derivation of the equation of dynamics in the displacements of the theory of elasticity takes into account only the first, linear invariant of the deformation tensor. L.I. Sedov in the textbook "Continuum Mechanics" gave an expression for the coefficient of volumetric expansion, which takes into account the second, quadratic, and third, cubic invariants of the strain tensor. In this paper, a complete equation of dynamics in displacements is derived, which contains the first, second and third invariants of the strain tensor. Taking into account the second and third invariants in the equation of dynamics in displacements allows for a more accurate calculation of the generation of oscillations and vibrations in the theory of elasticity.

*Keywords:* elasticity theory, equation of dynamics in displacements, strain tensor, wave generation.

## 1. Введение

Достаточно строгий и понятный вывод уравнения динамики теории упругости приведен в знаменитом «Курсе высшей математики» В. И. Смирнова [1] в § 104 «Основные уравнения теории упругости». В качестве исходного он использует выражение для относительного изменения объема упругого тела  $\theta$ , составленное из диагональных составляющих тензора деформаций

$$\theta = \varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z,$$

где относительные удлинения  $\varepsilon_x$ ,  $\varepsilon_y$ ,  $\varepsilon_z$  линейных элементов в направлении осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$  характеризуют производные

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x}, \varepsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y}, \varepsilon_z = \frac{\partial w}{\partial z}$$

от перемещений  $u$ ,  $v$ ,  $w$  вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

В курсе «Механики сплошной среды», охватывающем Гидрогазодинамику, Электродинамику и Теорию упругости Л. И. Седов в § 5 «Теория деформаций» в разделе «Коэффициент кубического расширения» ([2] с. 75) приводит более полное выражение для коэффициента объемного расширения

$$\theta = \sqrt{1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3} - 1,$$

содержащее линейный  $I_1$ , квадратичный  $I_2$  и кубичный  $I_3$  инварианты тензора деформаций. Л. И. Седов отмечает, что все курсы дисциплин механики сплошной среды пренебрегают высшими инвариантами: квадратичным  $I_2$  и кубичным  $I_3$ , учитывая лишь линейный первый инвариант, выражающийся через оператор дивергенции вектора перемещений

$$\theta \approx I_1 = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}. \quad (1.1)$$

Поэтому Леонид Иванович помечает это соотношение приближенным знаком равенства. Точный учет высших инвариантов пока

производится в небольшом количестве поисковых работ, например, в монографии А. Г. Куликовского и Е. И. Свешниковой [3]. Отметим, что научным руководителем Андрея Геннадьевича Куликовского был Л. И. Седов.

В выводе В. И. Смирнова комплекс  $\varepsilon_x + \varepsilon_y + \varepsilon_z$  коэффициента объемного расширения  $\theta$  никак не преобразуется и не видоизменяясь доходит до окончательного уравнения. Поэтому более сложный комплекс

$$\sqrt{1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3} - 1,$$

представленный Л. И. Седовым, содержащий высшие инварианты, тоже может в первоначальном виде войти в динамическое уравнение теории упругости.

## 2. Добавление в вывод Смирнова уравнения в перемещениях высших инвариантов

Для связи деформаций с силовыми воздействиями Владимир Иванович Смирнов записывает обобщенный закон Гука:

$$\sigma_x = 2G \left( \varepsilon_x + \frac{\theta}{m-2} \right), \tau_{xy} = G\gamma_{xy},$$

$$\sigma_y = 2G \left( \varepsilon_y + \frac{\theta}{m-2} \right), \tau_{yz} = G\gamma_{yz},$$

$$\sigma_z = 2G \left( \varepsilon_z + \frac{\theta}{m-2} \right), \tau_{zx} = G\gamma_{zx},$$

где  $G$  – модуль сдвига,  $m$  – коэффициент Пуассона. Скорости сдвига определяются такими суммами производных:

$$\gamma_{xy} = \gamma_{yx} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x},$$

$$\gamma_{xz} = \gamma_{zx} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x},$$

$$\gamma_{yz} = \gamma_{zy} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}.$$

В. И. Смирнов выписывает формулу (249) со с. 294 курса [1] для работы

$$A = G \left[ \frac{m-1}{m-2} \theta^2 - 2(\varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x) + \frac{1}{2} (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2) \right] = \\ = \frac{1}{4G} \left[ \frac{m}{m+1} S^2 - 2(\sigma_x \sigma_y + \sigma_y \sigma_z + \sigma_z \sigma_x - \tau_{xy}^2 - \tau_{yz}^2 - \tau_{zx}^2) \right].$$

Найдем состояние равновесия деформации и приложенной силы. Это состояние, когда деформации уравниваются внешней силой. Оно соответствует нулевому значению производной от работы по расстоянию. Производные от  $A$  по  $\varepsilon_i$ ,  $\gamma_{ij}$ ,  $\sigma_i$ ,  $\tau_{ij}$  даются формулами (250) со с. 295 курса [1]. Уравнения равновесия получаются такими:

$$G \left( \Delta u + \frac{m}{m-2} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + X = 0,$$

$$G \left( \Delta v + \frac{m}{m-2} \frac{\partial \theta}{\partial y} \right) + Y = 0,$$

$$G \left( \Delta w + \frac{m}{m-2} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right) + Z = 0,$$

где  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  – компоненты силы  $F$  вдоль осей  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Или в векторной форме

$$G \left( \Delta U + \frac{m}{m-2} \text{grad div } U \right) + F = 0.$$

Здесь  $\Delta$  – оператор Лапласа,  $U$  – вектор перемещения. Для получения динамического уравнения из уравнения равновесия в уравнении, согласно принципу Гамильтона, силы заменяются на произведение плотности на производную второго порядка от вектора перемещения

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} = G \left( \Delta U + \frac{m}{m-2} \text{grad div } U \right).$$

Такой результат получил В. И. Смирнов. Соберем слагаемые волнового оператора Даламбера в левой части уравнения

$$\rho \frac{\partial^2 U}{\partial t^2} - G \Delta U = G \frac{m}{m-2} \text{grad div } U. \quad (2.1)$$

Получено неоднородное волновое уравнение, правая часть которого генерирует вибрации конструкции. Если воспользоваться выражением для коэффициента объемного расширения, приведенного Л. И. Седовым, содержащим помимо первого еще второй, квадратичный, и третий, кубичный, инварианты

$$\theta = \sqrt{1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3} - 1, \quad (2.2)$$

то интенсивность колебаний конструкции при изменении на нее внешних сил может стать существенно выше. Перепишем векторное уравнение (2.1) в виде трех скалярных уравнений, заменив в нем упрощенное выражение для коэффициента объемного расширения  $\theta$  точным (2.2):

$$\rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - G \Delta u = G \frac{m}{m-2} \frac{\partial}{\partial x} \left( \sqrt{1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3} - 1 \right),$$

$$\rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} - G \Delta v = G \frac{m}{m-2} \frac{\partial}{\partial y} \left( \sqrt{1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3} - 1 \right),$$

$$\rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} - G \Delta w = G \frac{m}{m-2} \frac{\partial}{\partial z} \left( \sqrt{1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3} - 1 \right).$$

Ранее автором [4] были получены аналогичные динамические уравнения с использованием уравнений в перемещениях из монографии С. П. Тимошенко и Дж. Гудьера [5]:

$$G \nabla^2 u - \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = -X - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial x} \left[ (1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3)^{0,5} - 1 \right],$$

$$GV^2v - \rho \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = -Y - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial y} \left[ (1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3)^{0.5} - 1 \right],$$

$$GV^2w - \rho \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = -Z - (\lambda + G) \frac{\partial}{\partial z} \left[ (1 + 2I_1 + 4I_2 + 8I_3)^{0.5} - 1 \right].$$

В последних трех уравнениях  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  означают компоненты воздействия внешней силы по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .

### Заключение

Используя из учебника Л. И. Седова полное выражение для коэффициента объемного расширения, учитывающего помимо первого, линейного, еще второй, квадратичный, и третий, кубичный, инварианты тензора деформаций, переписан вывод динамического уравнения в перемещениях теории упругости, данный В. И. Смирновым, в котором учитывался только первый, линейный, инвариант, отражающий только нормальные перемещения.

Отмечено, что высшие инварианты, квадратичный и кубичный, при генерации волнового движения учитывают, как нормальные, так и тангенциальные перемещения. Учет высших инвариантов дает в расчете более интенсивные волновые колебания, возникающие при изменении внешних сил, действующих на конструкцию.

### Литература

1. *Смирнов В. И.* Курс высшей математики. Том IV, часть I. М. : Наука, 1974. 336 с.
2. *Седов Л. И.* Механика сплошной среды. Т. I. М. : Наука, 1973. 536 с.
3. *Куликовский А. Г., Свешникова Е. И.* Нелинейные волны в упругих средах. М. : Московский лицей, 1998. 416 с.
4. *Овсянников В. М.* Учет высших инвариантов тензора деформаций в задачах теории упругости. Доклад на LXXVIII Международной научно-практической конференции «Архитектура, строительство, транспорт, экономика» 21–22 ноября 2024. Санкт-Петербург.
5. *Тимошенко С. П., Гудьера Дж.* Теория упругости. М. : Наука, 1975. 576 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

### Секция «Водопользование и экология»

<i>Гурдин Р. А., Сушкова Л. Е.</i> Перспективы применения искусственного интеллекта в системах безопасности плавательных бассейнов . . . . .	3
<i>Терещенко Е. С., Макарова С. В.</i> Проблемы рекреационного водопользования в Санкт-Петербурге . . . . .	9
<i>Устюгов Д. Л., Ноа Сегура Эктор Луис, Мила Дома Юлиеми де ла Каридад</i> Определение закономерностей формирования грунтовых вод с использованием алгоритмов машинного обучения в северном гидрогеологическом бассейне (Сьего-де-Авила, Республика Куба) . . . . .	17
<i>Лю Хао, Федоров С. В.</i> Анализ и исследование выбросов сероводорода в канализационных перепадах шахтах различного типа . . . . .	25
<i>Корниенко Э. Ю., Светлицкий К. В., Игнатчик С. Ю.</i> Результаты исследования предметно области по изменению гидравлической и массовых нагрузок на очистные сооружения общесплавных систем водоотведения . . . . .	32
<i>Чжан Ифэй</i> Анализ устойчивости движения MINI ROV . . . . .	39
<i>Юй Шуайсянь</i> Моделирование осаждения частиц в тонкослойном модуле . . . . .	54
<i>Игнатчик С. Ю., Ковжаровская И. Б.</i> Направления адаптации сетей водоотведения поверхностного стока к условиям совокупного влияния урбанизации и изменения климата. . . . .	64
<i>Куликова Д. Н., Авсюкевич А. П.</i> Водозабор подземных вод. Подбор диаметров скважинных трубопроводов для устойчивой работы насосов . . . . .	73
<i>Косицкий С. С., Заболотских М. А., Руденко А. Е.</i> Экологические аспекты урбанизации в контексте «зеленой архитектуры» и ландшафтного дизайна. . . . .	85

**Секция «Геодезия, землеустройство и кадастры»**

*Ныркова А. Е., Волков Н. В.*  
Региональные особенности кадастровой оценки земельных участков . . . 90

*Романова А. П.*  
Разность трактования в нормативно-правовых актах  
как препятствие в согласовании и утверждении документации  
по планировке территории . . . . . 97

*Мила Дома Юлиеми де ла Каридад, Сидорина И. Е.*  
Геоинформационное картографирование Ленинградской области  
на основе данных переписи населения 2010 года . . . . . 105

*Рыбальченко В. Е., Ключенко К. И.*  
Теоретические основы оценки рыночной стоимости  
недвижимости на 2025 год . . . . . 112

**Секция «Информационные технологии  
и математическое моделирование»**

*Фот Н. П.*  
Методы математического моделирования при исследовании  
метрологической надежности . . . . . 119

*Кабайлов Д. Д., Наместников А. М.*  
Классификация элементов информационной модели  
с использованием нейросетевого алгоритма Node2Vec . . . . . 126

*Елсаков А. П., Смирнова В. Б.*  
Особенности переходного процесса систем маятникового типа . . . . . 132

*Савицкая М. Ю., Яркова О. Н.*  
Программный инструмент для оценки рисков финансовых  
инвестиций в строительстве . . . . . 140

*Яковлев Е. В.*  
Онтологическая модель как инструмент исследования  
прогностического управления остаточным ресурсом  
строительных объектов . . . . . 147

*Просвирнин Е. С.*  
Применение гибридных интеллектуальных систем для разработки  
приложений в строительном проектировании . . . . . 154

<i>Кланык А. Н.</i> Необходимость разработки программы комплексного анализа и оптимизации улично-дорожной сети. . . . .	162
<i>Пиндур С. В.</i> Комплексный метод контроля параметров строительной 3D-печати . . . . .	169

**Секция «Строительная физика,  
электроэнергетика и электротехника»**

<i>Епишкин А. Е., Костроминов А. А.</i> Анализ пользовательских характеристик ламп освещения . . . . .	176
<i>Плуток Д. А., Сергеев С. А., Яруллина А. Р.</i> Анализ и сравнение автоматического ввода резерва на основе реле и на основе микропроцессорного управления. . . . .	181
<i>Костиков А. А., Черемисин В. А., Чабаненко Н. А., Михайлов В. И.</i> Способы моделирования энергомодулей систем гарантированного электроснабжения критически важных объектов городской инфраструктуры . . . . .	194
<i>Черемисин В. А., Чабаненко Н. А., Костиков А. А., Михайлов В. И.</i> Обоснование и выбор метода оптимизации автономного энергомодуля системы гарантированного электроснабжения критически важного объекта городской инфраструктуры . . . . .	204
<i>Косицкий С. С., Заболотских М. А., Сопот В. Н.</i> Проблемы обеспечения звукоизоляции межэтажных перекрытий в жилых зданиях . . . . .	217

**Секция «Теплогазоснабжение и вентиляция»**

<i>Иванкин К. А., Щукина Т. В., Курасов И. С.</i> К вопросу выбора материалов для светопрозрачных ограждающих конструкций промышленных теплиц. . . . .	224
<i>Громов В. Д.</i> Расчет воздухораспределения конференц-зала: оценка точности нормативного метода на основе CFD-моделирования . . . . .	233

<i>Громов В. Д.</i> Энергоэффективность вентиляционных систем: сравнительное исследование различных конструкций входной коробки вентилятора . . . . .	242
<i>Заплаткина П. А., Ямлеева Э. У.</i> Анализ энергоэффективности VRF-систем и «Чиллер-фанкойлы». . . . .	249
<i>Марченко А. В., Воронина А. А.</i> Сравнительный анализ современных вариантов исполнения приточно-вытяжной вентиляции в многоквартирном жилом доме в городе Ульяновске . . . . .	257
<i>Марченко А. В., Кольцова К. А.</i> Расчет воздушного душирования на современном производстве . . . . .	267
<i>Марченко А. В., Зудилов Н. С.</i> Сравнение роторных решений для охлаждения воздуха . . . . .	275
<i>Марченко А. В., Козин А. С.</i> Анализ влияния энергосберегающих решений на общее энергопотребление жилого дома . . . . .	280
<i>Ротов П. В., Чеботарев П. Ю.</i> Энергосберегающие технологии в теплоснабжении . . . . .	289
<i>Иванов Д. С., Морозов А. Ю.</i> Использование линейной множественной регрессии для прогнозирования параметров приточной струи воздуха . . . . .	295
<i>Носкова А. Л., Морозов А. Ю.</i> Локализация и предотвращение развития пожара на складских комплексах с высотным стеллажным хранением . . . . .	303
<i>Симонов Д. С., Морозов А. Ю., Бесов В. В.</i> Исследование качества воздуха и микроклимата в учебных кабинетах школы . . . . .	311

### **Секция «Математика»**

<i>Игнатушина И. В.</i> Д. А. Граве и его научно-педагогическая деятельность по дифференциальной геометрии в Петербурге . . . . .	322
<i>Овсянников В. М.</i> Уравнение динамики в перемещениях теории упругости с высшими инвариантами, составленное по материалам академиком Л. И. Седова и В. И. Смирнова . . . . .	331

Научное издание

**СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В ИНЖЕНЕРНЫХ  
СИСТЕМАХ И ГОРОДСКОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Сборник материалов II Национальной (Всероссийской)  
научно-практической конференции

24–28 марта 2025 г.

Компьютерная верстка *О. Н. Комиссаровой*

Подписано к печати 30.05.2025. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага офсетная.

Усл. печ. л. 19,82. Тираж 300 экз. Заказ 64. «С» 32.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

ДЛЯ ЗАПИСЕЙ