

# АСТ

# АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛЬСТВО ТРАНСПОРТ

ARCHITECTURE • CONSTRUCTION • TRANSPORT



ТОМ 5, № 4  
2025



16+

# АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛЬСТВО ТРАНСПОРТ

Научный журнал открытого доступа

Издаётся с 2021 года

# ARCHITECTURE CONSTRUCTION TRANSPORT

Open access scientific journal

The journal has been published since 2021

Том 5, № 4  
2025

**Цели и задачи**

Научно-информационный журнал «Архитектура, строительство, транспорт» посвящен рассмотрению широкого круга вопросов теоретического и практического характера, направленных на решение проблем в области архитектуры, строительства и транспорта. Его основной целью является создание доступного информационно-коммуникационного пространства для обсуждения новых знаний и подходов, осмысливания давно существующих и анализа и объяснения лишь недавно выявленных феноменов, внедрения научных и технических достижений в практику.

Задачами журнала являются: предоставление ученым возможности публиковать результаты своих исследований, привлечение внимания к актуальным и перспективным научным разработкам, а также освещение передового опыта и реальных достижений в заглавных областях знаний.



*Наименование и содержание рубрик журнала соответствуют отраслям науки и группам специальностей научных работников Номенклатуры научных специальностей, по которым присуждаются ученыe степени.*

2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)	2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)
2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)	2.1.9 Строительная механика (технические науки)
2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)	2.1.11 Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура, технические науки)
2.1.4 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки)	2.1.12 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура, технические науки)
2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)	2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки)

*Также редакция принимает к публикации материалы по следующим специальностям:*

2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)	2.5.6 Технология машиностроения (технические науки)
---	---



**Журнал издается с 2021 г.**

**Периодичность:** 4 раза в год

**Тираж:** 400 экз.

**Префикс DOI:** 10.31660

**Регистрационный номер:** ПИ № ФС77-80657 от 07.04.2021 года, выдан Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор)

**Условия распространения материалов:** контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License

**Учредители:** ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», Главное управление строительства Тюменской области

**Издатель:** ФГБОУ ВО «Тюменский индустриальный университет», 625000, Тюмень, ул. Володарского, 38, +7 (3452) 28-35-91

© Архитектура, строительство, транспорт, редактирование, оформление макета, 2025

**Сайт журнала:** <https://www.ast.tyuuiu.ru>

**Индексирование:** журнал входит в перечень изданий, рекомендованных ВАК, индексируется в РИНЦ, международных базах DOAJ, ROAD

**Подписной индекс:** в каталоге агентства «Пресса России» – 79619 ([www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru))

**Цена:** свободная

**Адрес редакции:** 625001, Тюмень, ул. Луначарского, 2, к. 117

**Телефон редакции:** +7 (3452) 28-37-50

**E-mail:** ast@tyuuiu.ru

**Редакторы-корректоры:** Маслова Е. А., Вахрушева Н. В.

**Верстка:** Николюк С. А.

**Отпечатано:** ООО «Издательско-полиграфический центр "Экспресс"», 625048, Тюмень, ул. Минская, 3г, к. 3, +7 (3452) 55-58-47

**Дата выхода:** 26.12.2025

**Aims and Scope**

The scientific and information journal "Architecture, Construction, Transport" ("Arhitektura, stroitel'stvo, transport") addresses a wide range of theoretical and practical issues aimed at solving problems in the field of architecture, construction, and transport. The purpose of the journal is to create an accessible information and communication space for discussing new knowledge and approaches, making sense of long-standing phenomena, analyzing and explaining recently discovered ones, and introducing scientific and technical achievements into practice.

The main objectives of the journal are: providing scientists with the opportunity to publish the results of their research, drawing attention to the currently important and promising scientific research results, as well as covering best practices and real achievements in major areas of knowledge.



*The name and content of the journal sections correspond to the branches of science and groups of specialties of scientific workers according to the Nomenclature of Scientific Workers' Specialties for which academic degrees are awarded.*

2.1.1 Building structures, buildings and facilities (engineering sciences)	2.1.8 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges, and transportation tunnels (engineering sciences)
2.1.2 Bases and foundations, underground structures (engineering sciences)	2.1.9 Structural mechanics (engineering sciences)
2.1.3 Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply, and illumination (engineering sciences)	2.1.11 Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture, engineering sciences)
2.1.4 Water supply and sanitation, construction systems for water resources protection (engineering sciences)	2.1.12 Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture, engineering sciences)
2.1.5 Construction materials and products (engineering sciences)	2.9.5 Road transport operation (engineering sciences)

*The editorial board also considers manuscripts in the following specialties:*

2.5.5 Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing (engineering sciences)	2.5.6 Mechanical engineering technology (engineering sciences)
---	--



**The journal has been published since 2021**

**Frequency:** 4 times a year

**Print run:** 400 copies

**DOI Prefix:** 10.31660

**Registration Number:** PI No. FS77-80657 as of 07 April 2021 issued by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media (Roscomnadzor)

**Distribution:** content is distributed under Creative Commons Attribution 4.0 License

**Founders:** Industrial University of Tyumen, General Administration of Construction of the Tyumen region

**Publisher:** Industrial University of Tyumen, 625000, Tyumen, 38 Volodarskogo St., +7 (3452) 28-35-91

**Website:** <https://www.ast.tyuuiu.ru>

© Architecture, Construction, Transport, editing, design, 2025

**Indexation:** the journal is included in the index of periodical publications recommended by the State Commission for Academic Degrees and Titles, and in the RISC database, in DOAJ, ROAD databases

**Subscription Index:** in the Russian Press Agency catalog – 79619 ([www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru))

**Price:** flexible

**Address of editorial office:** 625001, Tyumen, 2 Lunacharskogo St., office 117

**Editorial office phone number:** +7 (3452) 28-37-50

**E-mail:** [ast@tyuuiu.ru](mailto:ast@tyuuiu.ru)

**Editors-proofreaders:** Evgenia A. Maslova, Natalia V. Vakhrusheva

**Page layout:** Svetlana A. Nikolyuk

**Printed by** LLC "Express", 625048, Tyumen, 3g Minskaya St., +7 (3452) 55-58-47

**Published:** 26.12.2025

### Главный редактор

**Мальцева Т. В.**, д. ф.-м. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация); <https://orcid.org/0000-0002-0274-0673>, Scopus Author ID 57190863290

### Редакционная коллегия

**Абдикаримов Р. А.**, д. ф.-м. н., профессор, Ташкентский архитектурно-строительный университет, Ташкент (Республика Узбекистан)

**Абдураманов А. А.**, д. т. н., профессор, Таразский региональный университет им. М. Х. Дулати, Тараз (Республика Казахстан)

**Амирзода О. Х.**, д. т. н., доцент, Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии Национальной академии наук Таджикистана, Душанбе (Республика Таджикистан)

**Арынов К. К.**, доктор архитектуры, профессор, Евразийский национальный университет им. Л. Н. Гумилева, Астана (Республика Казахстан)

**Асенов А. Ц.**, PhD, доцент, Русенский университет им. Ангела Кынчева, Русе (Республика Болгария)

**Барсуков В. Г.**, д. т. н., профессор, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

**Бартоломей Л. А.**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация)

**Бородинец А. В.**, д. т. н., профессор, Рижский технический университет, Рига (Латвийская Республика)

**Ватин Н. И.**, д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург (Российская Федерация)

**Грдич З.**, д. т. н., профессор, Нишский университет, Ниш (Республика Сербия)

**Джозеф О. О.**, PhD, доцент, Университет Ковенанта, Ота (Федеративная Республика Нигерия)

**Захаров Н. С.**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация)

**Кудрявцев С. А.**, д. т. н., профессор, член-корреспондент РААСН, Дальневосточный государственный университет путей сообщения, Хабаровск (Российская Федерация)

**Мамян З. Г.**, кандидат архитектуры, профессор, Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Ереван (Республика Армения)

**Менендес Пидаль И.**, PhD, профессор, Политехнический университет Мадрида, Мадрид (Испания)

**Миронов В. В.**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация)

**Мурали Г.**, PhD, доцент, Университет SASTRA, Танджавур (Республика Индия)

**Овчинников Е. В.**, д. т. н., профессор, Гродненский государственный университет им. Янки Купалы, Гродно (Республика Беларусь)

**Панфилов А. В.**, кандидат архитектуры, доцент, Департамент строительства, архитектуры и земельных отношений Администрации города Салехарда, Салехард (Российская Федерация)

**Попок Н. Н.**, д. т. н., профессор, Полоцкий государственный университет им. Евфросинии Полоцкой, Новополоцк (Республика Беларусь)

**Райчик М.**, д. т. н., профессор, Ченстоховский технологический университет, Ченстохова (Республика Польша)

**Савинкин В. В.**, д. т. н., доцент, Северо-Казахстанский университет им. М. Козыбаева, Петропавловск (Республика Казахстан)

**Саксена А.**, PhD, профессор, Уттаракхандский университет Дев Бхуми, Дехрадун (Республика Индия)

**Соколов В. Г.**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация)

**Султанова Д. Н.**, доктор архитектуры, профессор, Самаркандский архитектурно-строительный университет им. Мирзо Улугбека, Самарканд (Республика Узбекистан)

**Тарасенко А. А.**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация)

**Уляшева В. М.**, д. т. н., профессор, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург (Российская Федерация)

**Федюк Р. С.**, д. т. н., доцент, Владивостокский государственный университет, Владивосток (Российская Федерация)

**Ци Ч.**, д. ф.-м. н., профессор, Пекинский университет гражданского строительства и архитектуры, Пекин (Китайская Народная Республика)

**Чекардовский М. Н.**, д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация)

**Чжao B.**, PhD, профессор, Северо-Восточный университет, Шэньян (Китайская Народная Республика)

**Якунин Н. Н.**, д. т. н., профессор, Оренбургский государственный университет, Оренбург (Российская Федерация)

### Редакционный совет

**Набоков А. В.**, к. т. н., доцент, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация) – **председатель**

**Власов В. М.**, д. т. н., профессор, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Москва (Российская Федерация)

**Овчинников И. Г.**, д. т. н., профессор, действительный член Академии транспорта РФ, Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь (Российская Федерация)

**Попов А. Ю.**, д. т. н., профессор, Омский государственный технический университет, Омск (Российская Федерация)

**Editor-in-Chief**

**Tatyana V. Maltseva**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation); <https://orcid.org/0000-0002-0274-0673>, Scopus Author ID 57190863290

**Editorial Board**

**Rustamkhan A. Abdikarimov**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Tashkent University of Architecture and Civil Engineering, Tashkent (Republic of Uzbekistan)

**Abdumanap A. Abduramanov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, M. Kh. Dulaty Taraz Regional University, Taraz (Republic of Kazakhstan)

**Orif H. Amirzoda**, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Institute of Water Problems, Hydropower and Ecology of the National Academy of Sciences of Tajikistan, Dushanbe (Republic of Tajikistan)

**Kaldybai K. Arynov**, Dr. Sci. (Architecture), Professor, L. N. Gumilyov Eurasian National University, Astana (Republic of Kazakhstan)

**Asen Ts. Asenov**, PhD, Associate Professor, "Angel Kanchev" University of Ruse, Ruse (Republic of Bulgaria)

**Vladimir G. Barsukov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)

**Leonid A. Bartolomey**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation)

**Anatoly V. Borodinecs**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Riga Technical University, Riga (Republic of Latvia)

**Nikolay I. Vatin**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Peter the Great Saint Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg (Russian Federation)

**Zoran Grdić**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, University of Niš, Niš (Republic of Serbia)

**Olufunmilayo O. Joseph**, PhD, Associate Professor, Covenant University, Ota (Federal Republic of Nigeria)

**Nikolay S. Zakharov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation)

**Sergey A. Kudryavtsev**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of RAACS, Far Eastern State Transport University, Khabarovsk (Russian Federation)

**Zaruhi G. Mamyany**, Cand. Sci. (Architecture), Professor, National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan (Republic of Armenia)

**Ignacio Menendez Pidal**, PhD, Professor, Madrid Polytechnic University, Madrid (Spain)

**Victor V. Mironov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation)

**Gunasekaran Murali**, PhD, SASTRA Deemed to be University, Thanjavur (Republic of India)

**Evgeniy V. Ovchinnikov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Yanka Kupala State University of Grodno, Grodno (Republic of Belarus)

**Alexander V. Panfilov**, Cand. Sci. (Architecture), Associate Professor, Department of Construction, Architecture and Land Relations of the Administration of Salekhard, Salekhard (Russian Federation)

**Nikolay N. Popok**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Euphrosyne Polotskaya State University of Novopolotsk, Polotsk (Republic of Belarus)

**Marlena Rajchik**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa (Republic of Poland)

**Vitalii V. Savinkin**, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Kozybayev University, Petropavlovsk (Republic of Kazakhstan)

**Abhishek Saxena**, PhD, Professor, Dev Bhoomi Uttarakhand University, Dehradun (Republic of India)

**Vladimir G. Sokolov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation)

**Dilshoda N. Sultanova**, Dr. Sci. (Architecture), Professor, Samarkand State Architectural and Civil Engineering University named Mirzo Ulugbek, Samarkand (Republic of Uzbekistan)

**Alexander A. Tarasenko**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation)

**Vera M. Ulyasheva**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg (Russian Federation)

**Roman S. Fediuk**, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Vladivostok State University, Vladivostok (Russian Federation)

**Chengzhi Qi**, Dr. Sci. (Physics and Mathematics), Professor, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing (China)

**Mikhail N. Chekardovskiy**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation)

**Wen Zhao**, PhD, Professor, Northeastern University, Shenyang (China)

**Nikolay N. Yakunin**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Orenburg State University, Orenburg (Russian Federation)

**Editorial Council**

**Alexander V. Nabokov**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation) – **Chairman**

**Vladimir M. Vlasov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Moscow Automobile and Road Construction State Technical University, Moscow (Russian Federation)

**Igor G. Ovchinnikov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Full Member of the Academy of Transport of Russian Federation, Perm National Research Polytechnic University, Perm (Russian Federation)

**Andrej Yu. Popov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Omsk State Technical University, Omsk (Russian Federation)

## АРХИТЕКТУРА

## СТРОИТЕЛЬСТВО

## ТРАНСПОРТ

## ИНФОРМАЦИЯ ДЛЯ АВТОРОВ

### Содержание

<b>О. Ю. Костко, Т. В. Смирнова, К. А. Туранская</b> Творческие концепции проектирования интерьера в рамках междисциплинарного подхода .....	8
<b>О. А. Богомолова, С. А. Богомолов, Н. А. Богомолов</b> Расчет несущей способности многощелевых фундаментов .....	24
<b>А. Г. Жулин, О. В. Сидоренко</b> Определяющие параметры для расчета барботажных дегазаторов .....	36
<b>Д. И. Каштанов</b> Исследование золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных блоков твердотопливного котла малой мощности .....	50
<b>Т. В. Аниканова, А. С. Погромский, Е. А. Лукаш</b> Асфальтобетон с использованием минерального порошка на основе электросталеплавильных шлаков .....	64
<b>Т. В. Крижанивская, В. В. Воронцов, Б. А. Тайех, Ф. С. Куличенко</b> Механические характеристики вязкоупругого водонасыщенного основания .....	74
<b>Н. С. Захаров, Н. О. Сапоженков, В. А. Ракитин</b> Оптимизация структуры парка грузовых автомобилей для обслуживания магистральных газопроводов .....	86
<b>Е. С. Козин, А. В. Мальшаков</b> Управление загрузкой станции технического обслуживания автомобилей с использованием теории расписаний .....	100
Правила подготовки рукописи (на русском языке) .....	110
Правила подготовки рукописи (на английском языке) .....	112

## Contents

**Oksana Yu. Kostko, Tatiana V. Smirnova, Karolina A. Turanskaia**  
Creative interior design concepts within  
an interdisciplinary approach ..... 8

## ARCHITECTURE

**Oksana A. Bogomolova, Sergey A. Bogomolov,  
Nikita A. Bogomolov**  
Calculation of bearing capacity for multi-slot foundations ..... 24

## CONSTRUCTION

**Alexander G. Zhulin, Olga V. Sidorenko**  
Key parameters for calculating bubbling degassers ..... 36

**Dmitriy I. Kashtanov**  
Study of ash deposits on the outer surfaces of convective  
tubes in a low-power solid fuel boiler ..... 50

**Tatiana V. Anikanova, Alexey S. Pogromsky, Evgeny A. Lukash**  
Asphalt concrete using mineral powder based  
on electric steelmaking slag ..... 64

**Tatiana V. Krizhanivskaya, Viacheslav V. Vorontsov,  
Bassam A. Tayeh, Faina S. Kulichenko**  
Mechanical characteristics of viscoelastic water-saturated  
foundation ..... 74

**Nikolay S. Zakharov, Nikolay O. Sapozhenkov,  
Vladimir A. Rakitin**  
Truck fleet structure optimization for main gas pipelines  
servicing ..... 86

## TRANSPORT

**Evgeniy S. Kozin, Albert V. Malshakov**  
Managing the loading of a car service station using  
scheduling theory ..... 100

Manuscript preparation guidelines (In Russian) ..... 110  
Manuscript preparation guidelines (In English) ..... 112

## INFORMATION FOR AUTHORS

Научная статья / Original article

УДК 37.378

DOI: <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-8-23>

EDN: <https://elibrary.ru/artmvv>

2.1.12 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура)



## Творческие концепции проектирования интерьера в рамках междисциплинарного подхода

О. Ю. Костко, Т. В. Смирнова, К. А. Туранская

Тюменский индустриальный университет

Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

turanskaya02@inbox.ru



**Аннотация.** Разрыв между теоретическими знаниями об историко-стилевых принципах проектирования и живым проектным процессом – актуальная проблема архитектурного образования. Мы предлагаем в процессе подготовки студентов реализовывать междисциплинарный подход, основанный на параллельном преподавании двух дисциплин: теоретического анализа эволюции интерьерных стилей и практического проектирования интерьера жилого пространства. В качестве примеров рассмотрены проектные решения студентов третьего курса кафедры дизайна архитектурной среды института архитектуры и дизайна Тюменского индустриального университета (г. Тюмень), а также дано теоретическое аналитическое обоснование полученных результатов. Установлено, что студенты, получившие предварительную теоретическую базу, более грамотно применяют стилевые принципы при проектировании интерьера, не используя интуитивное копирование. В рамках междисциплинарного подхода у обучающихся развиваются требуемые компетенции: художественно-творческое мышление, колористическая и визуальная культура, умение оперировать смыслообразующими элементами стиля и адаптировать их к современным условиям. Результаты исследования доказывают целесообразность изучения теории архитектуры и искусства в контексте их исторического развития как основы для формирования проектной культуры.

**Ключевые слова:** творческие концепции проектирования, архитектурное образование, междисциплинарный подход в архитектуре, проектирование интерьера, жилое пространство

**Для цитирования:** Костко О. Ю., Смирнова Т. В., Туранская К. А. Творческие концепции проектирования интерьера в рамках междисциплинарного подхода. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):8–23. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-8-23> EDN: ARTMVV

## Creative interior design concepts within an interdisciplinary approach

Oksana Yu. Kostko, Tatiana V. Smirnova, Karolina A. Turanskaia

Industrial University of Tyumen

Tyumen, 38 Volodarskogo St., 625000, Russian Federation

turanskaya02@inbox.ru



**Abstract.** This gap between theoretical knowledge about historical and stylistic design principles and design process is an up-to-date problem of architectural education. During the students teaching, we suggest to implement the interdisciplinary approach, based on the parallel studying of two disciplines: the theoretical analysis of the interior styles evolution and the practical design of living space. Project solutions by third-year

students from the department of architectural environment design at the Industrial University of Tyumen were considered as examples. As well as the theoretical and analytical justification of the results obtained was provided. It was established that the students who have received a preliminary theoretical base apply stylistic principles in interior design more competently, without using the intuitive copying. The interdisciplinary approach promotes the required competencies developing, such as artistic and creative thinking, coloristic and visual culture, and the ability to operate with meaning-forming elements of style and adapt them to modern conditions. The research results prove the necessity of studying the theory of architecture and art in the context of their historical development as the basis for the formation of project culture.

**Keywords:** creative design concepts, architectural education, interdisciplinary approach in architecture, interior design, residential space

**For citation:** Kostko O. Yu., Smirnova T. V., Turanskaia K. A. Creative interior design concepts within an interdisciplinary approach. *Architecture, Construction, Transport.* 2025;5(4):8–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-8-23>

## 1. Введение / Introduction

Исследование обращено к актуальной педагогической проблеме: как преодолеть разрыв между теоретическими знаниями о стилях и живым проектным процессом? Как научить студента видеть в историческом стиле не просто набор формальных признаков, а языковую систему, содержащую в себе культурные, социальные и эстетические смыслы? Как развить способность к проведению экспертных исследований, навыки самостоятельной творческой работы со сбором, систематизацией и обработкой полученной информации и ее творческой интерпретацией?

Объектом нашего исследования являлся междисциплинарный подход, объединяющий теоретический анализ эволюции интерьерных стилей с практическим проектированием жилого пространства. Предметом исследования выступало стиле- и формообразование интерьера жилища как способ эстетизации и стилизации.

Цель исследования: обоснование стадиального ведения работы над курсовым проектом по дисциплине «Проектирование интерьера» у студентов направления «Дизайн архитектурной среды» в рамках междисциплинарного подхода, предполагающего применение выразительных и изобразительных возможностей для осмыслиения культуры пространства и его предметного наполнения.

Актуальность исследования обусловлена глобальными тенденциями в архитектурном образовании, которое переживает трансформацию от узкоспециализированной подготовки к междисциплинарной модели, интегрирующей знания из разных научных сфер. Так, например, знание экологии находит применение в разработке биофильного дизайна. Устойчивое проектирование и экологическая осознанность становятся обязательными компонентами образовательных программ [1]. Психологические и нейробиологические знания трансформируются в нейроархитектуру. Программирование желаемых поведенческих реакций, поддержание психического здоровья и улучшение благополучия посредством геометрии пространства, цвета и сенсорных элементов сейчас не фантазия, а результат влияния когнитивного и эмоционального дизайна (cognitive-emotional design) [2]. Знания из социологии и социальной психологии применяются при проектировании общественных пространств, способствующих социальному взаимодействию и укреплению сообщества [3]. Семиотика, культурология, эргономика, физика света и материаловедение, безусловно, дополняют систему знаний проектного мышления.

Междисциплинарное обучение развивает у студентов способность интегрировать знания из разных областей для решения комплексных задач [4]. При этом важно не только постоянное усовершенствование теоретической базы, сколько применение этих знаний на практике [5]. Взаимодополнение теоретических курсов и проектного процесса повышает осведомленность студентов о

воздействии дизайна на окружающую среду и общество, формируя тем самым целостное, глубинное профессиональное мышление взамен простого творческого самовыражения.

Хотя междисциплинарность в архитектурном образовании признана необходимой, авторы предлагают сосредоточить внимание на критически важной паре: интерьерном проектировании и историко-стилевом анализе. Выбор не является произвольным – он вытекает из профессионального опыта авторского коллектива.

Совмещение исторической и стилевой грамотности – базовый принцип, благодаря которому студенты-архитекторы могут создавать инновационные дизайнерские решения, находясь в контексте места и истории. Современная аудитория ценит культурные отголоски – намеки, порождающие эмоции и осмыслиенную связь пространства и его обитателей [6]. Если говорить о дизайне интерьера, понимание эволюции художественного образа демонстрирует здесь трансформацию эстетических принципов и их адаптацию к современным условиям [7]. Именно эволюция как таковая – основа для стилизации и определения жанровой специфики интерьера. Так, знания архитектуры переплетаются с изобразительным искусством, декоративно-прикладным творчеством и дизайном для создания целостной предметно-пространственной среды со смыслом. Это синтез искусств, где каждый элемент работает как часть единого целого. Мебель, декор, освещение и архитектура должны восприниматься и создаваться студентом как ансамбль.

Стоит также затронуть глобализацию рынка труда, требующего от архитекторов и дизайнеров способности работать в мультикультурной и мультидисциплинарной среде [8]. Будущим специалистам необходимо развивать и повышать творческие навыки, поскольку постоянное усовершенствование технологической базы не заменяет собой личные приобретенные знания – теоретические и практические. И если речь идет о тонко организованной системе – жилой среде, такие задания в рамках курсового проектирования, как стилизация для нестандартного заказчика или интерьер «в духе мастера», являются полезным и эффективным педагогическим инструментом [9], благодаря которому удается донести до студентов мысль, что общее и главное впечатление от проекта должно оставаться эстетичным и оригинальным, а сам проект – возможным для реализации.

Новизна исследования заключается в том, что если традиционно история стилей воспринимается как фоновое знание, то в предложенном подходе она становится активным инструментом проектного метода. Историко-стилевой анализ интегрируется в рабочий процесс проектирования не на завершающих этапах (как справочное обоснование решения), а на всех стадиях творческого развития. Сбор аналогов, анализ архетипических элементов, выявление трансформационных закономерностей между эпохами – все это становится методологической основой для генерирования собственных дизайнерских идей. Предпроектное исследование, строящееся на понимании исторического контекста, позволяет студентам не просто выбирать из каталога готовых решений, а создавать оригинальные проекты.

## **2. Материалы и методы / Materials and methods**

Для достижения поставленной цели необходимо было решить определенные задачи.

1. Раскрыть взаимодействие теории (в частности, дисциплины «Эволюция стилей в интерьере») и практики (на примере проектирования интерьера).
2. Определить теоретико-методологические координаты для стилизации (неоготика – викторианский стиль, неорусский стиль – модерн, авангард), а также обозначить, какие приемы – формальные, композиционные или символические – выявляются через анализ подлинных источников и как они трансформируются в контексте современного жилого пространства.
3. Продемонстрировать методику реализации междисциплинарного подхода в ходе учебного процесса и на примерах студенческих работ: как успешная стилизация базируется на глубоком понимании культурного контекста.

Информационно-эмпирическая база исследования представляла собой литературные источники отечественных и зарубежных авторов (дизайнеров, архитекторов, деятелей культуры и искусства), труды по теории и истории искусства и культуры. В работе использованы курсовые проекты студентов третьего курса кафедры дизайна архитектурной среды (ДАС) института архитектуры и дизайна (АРХиД) Тюменского индустриального университета (ТИУ) разных лет.

Исследование опиралось на педагогический опыт преподавателей ТИУ, объединяющий методы качественного анализа с практической апробацией в работе. Этот подход позволяет не просто теоретически разработать методику, но апробировать ее в реальных условиях, поэтапно уточняя с учетом полученных результатов на каждом этапе студенческого проектирования. Это особенно важно для исследования в области архитектурного образования, где связь теории и практики критична.

Основным методом сбора данных являлся детальный анализ курсовых проектов студентов. Каждый проект рассматривался как демонстрация применения междисциплинарного подхода. В список компонентов анализа вошли: визуальный анализ проектной документации, анализ предпроектного исследования, интерпретация стилевых и формообразующих решений, а также оценка синтеза теории и практики в итоговом проектном решении. Немаловажным стало систематическое наблюдение за учебным процессом на практических занятиях и консультациях, фиксирующее взаимодействие студентов с теоретическим материалом и практическими задачами. Каждая работа студента оценивалась на уровне проектной деятельности (стилевая грамотность, осмыслинность, оригинальность, композиционная целостность) и на уровне развития компетенций (аналитические способности, творческое и критическое мышление, коммуникативность).

Междисциплинарный подход в данном исследовании стал возможным благодаря четко выстроенной структуре образовательного процесса, когда две взаимодополняющие дисциплины – история дизайна интерьеров (теоретическая) и проектирование интерьеров (практическая) – преподаются параллельно. Такая организация курсов соответствует современным требованиям к образованию, ориентированным на более качественное усвоение материала. При этом поддерживается информационный обмен и обратная связь для корректировки образовательного процесса: а) преподаватель теоретической дисциплины узнает, какие стилевые концепции студент выбрал для проекта, и встраивает дополнительный материал, обеспечивающий более глубокое понимание темы; б) преподаватель практического курса отслеживает, какие сложности возникают при применении теории в практике, и передает эту информацию коллеге; в) в конце семестра проводится совместный анализ проектов.

### **3. Результаты и обсуждение / Results and discussion**

Для студентов, выбравших направление «Проектирование интерьера», третий год обучения считается началом профессионального отсчета. Студенты разрабатывают концепцию жилого пространства, ориентируясь на образ реального или воображаемого заказчика. Педагогическая практика показывает, что для учащихся понятие «стильный интерьер» имеет скорее качественную, структурную и образную, нежели историко-временную категорию. Чаще всего их проектное мышление привязывается к минималистичной современной среде, которая гипотетически может быть реализована и востребована у большинства. Задачи дисциплины, ориентированные на развитие дизайнерского абстрактного и креативного, нестандартного мышления, в свою очередь, нацелены на формирование матрицы – структурированной системы взаимосвязей между формальными, функциональными, эстетическими и культурно-историческими параметрами объекта. Это обращение к опыту прошлого, выявление наиболее общих, постоянных принципов в ансамбле интерьера, образности предметно-пространственного наполнения. В творческом процессе происходит взаи-

модействие зрительного восприятия, воображения, образного мышления и художественного переосмысливания различных источников. Так, орнамент для декорирования стен может быть скопирован с бордюра гобелена или росписи фарфоровой чашки, поскольку каждая мелочь, как важная составляющая, представляет переход количественного в качественное. «Дом как носитель общественных представлений отождествляется с домом города и государства» [10], однако в практической и теоретической деятельности у студентов эти базовые составляющие подменяются элементарным каталогным выбором предметов, мотивированным современными тенденциями в целом. Поэтому на третьем году обучения более «широкую» историю искусств заменяет более узкая теоретическая дисциплина «Эволюция стилей в интерьере», помогающая осмысливать взаимосвязи человека, эпохи и архитектурной среды как важные социокультурные установки.

Термин «стиль» применительно к архитектурной среде предполагает трактовку исторически и формально сложившейся системы. Здесь принципы единства формы и идейно-художественного содержания лежат в основе образной выразительности как одного предмета, так и целого синтеза искусств. Эта совокупность феноменов эстетического порядка (фактуры, цвета, ритма и т. д.) не возникает произвольно. Поэтому для готового архитектурно-дизайнерского решения необходим тот самый багаж, собранный из маркеров стиля, например, асимметричный рокайль в рококо, плавные линии модерна или стрельчатые арки готики.

Связанные с пространственно-временным фактором образ и стиль жизни человека трансформируются на конфигурацию пространства и превращают его в функционирующую архитектурную среду, где человек находит свое место. Это соединение незримых духовных и овеществленных материальных составляющих, опыт суммирования которых влияет на уровень профессиональных компетенций, на аналитику и практическую реализацию идеи в рамках проектной культуры [11].

Говоря о значении термина «проектная культура» как о совокупности «логически взаимосвязанных знаний, умений и владений, базирующихся на общепризнанных стандартах и принципах в области проектной деятельности»<sup>1</sup>, мы, по мнению Д. М. Семеновой, сталкиваемся с вполне грамотной и универсальной научной абстрактной формулировкой. Она соответствует теоретическим установкам старых образовательных программ без учета постоянной смены технологий, внедрения ИИ, новых материалов и нового поколения заказчиков. При этом «общепризнанный стандарт» не синхронизируется с требованиями индивидуального подхода, а заимствование и повторение без новаторства становится для проектирования интерьера тупиковой ветвью. К сожалению, нет (да и может ли быть в принципе?) единого мнения по поводу универсального учебника по программе «Проектирование интерьера». Можно лишь выстроить методологию как стадиальный порядок, предполагающий последовательное прохождение этапов – от первичного теоретического осмысливания и анализа референсов до финальной проверки и корректировки. Кроме литературы по стилям, построенной на историко-географическом подходе, мы не имеем общепризнанной теории интерьерного искусства, а специализированной литературы для обучающихся данной специальности немного. Поэтому каждый индивидуальный педагогический опыт архитектора, учитывающий конкретную ситуацию проектного задания, видится нам полезным.

Указывая на эмоционально-пространственные предпосылки данного задания, мы просим не только учитывать социокультурную составляющую проекта (возраст и пол, статус и образ жизни, вкусы и увлечения заказчика), но и прорабатывать ситуативные моменты, где необходим компромисс.

<sup>1</sup> Семенова Д. М. Проектная культура и методика ее исследования в муниципальных органах власти г. Перми. В сб.: Современный город: власть, управление, экономика. 2018;1:168–174.

В качестве практической реализации представляем три варианта готовых курсовых работ по дисциплине «Проектирование интерьера», где первая стадия – сбор и анализ информации – будет иметь различные аспекты, как в уравнении с известными и неизвестными.

Рассмотрим первый пример студенческой работы. Известны заказчики – это фантазийные персонажи в неоготическом, даже гротескном образе – семейство Аддамс. При том, что Аддамс – изначально персонажи комиксов, они весьма необычны даже для формата первоисточника. Подчеркнутая готичность и любовь ко всему нечеловеческому и потустороннему – отличительные черты этих мрачных обитателей огромного дома. Логичным и весьма оригинальным выглядела идея спроектировать современное технологическое жилье, но в викторианском стиле с акцентом на неоготике, наполненное эстетикой романтизма. Истории об этой семье по жанру относятся к черному юмору и, хоть и через призму жесткой и местами пугающей сатиры, демонстрируют воплощение идеальной семьи, или американской мечты. Поэтому функциональное наполнение и назначение комнат включает стандартный набор: спальни, гостиную, столовую и кухню, рабочий кабинет и т. д. При этом предметное наполнение интерьера с соответствующей сюжетной канвой выражает индивидуальные пристрастия его обитателей (рис. 1).

Предметное наполнение интерьера кроме функциональной стороны всегда несет сакральный, образный смысл. Объект создает эмоциональную связь между телом и средой и, будучи акцентом в пространстве, превращается в условный сигнал, понимать значение которого, считывать его иносказательную природу – одна из важнейших компетенций и для «средовика», и для «интерьерщика», то есть любого специалиста, работающего в сфере архитектуры, искусства и дизайна [12].

На лекциях по теоретической дисциплине при рассмотрении исторических или современных стилизованных примеров неоготических и викторианских интерьеров был сделан акцент на сходстве и различии как с подлинным средневековьем, так и с грамотным или неграмотным, рациональным или эмоциональным вариантами адаптации. Неоромантические представления о стиле готики превращают ее яркий витражный образ в мрачную ахроматику. Это и определило общую колористическую гамму в темных тонах, но с большим количеством воздуха и света, как того требует современное понятие комфортной среды. «Готизация» здесь понимается не как буквальное воспроизведение средневековых форм, а как создание атмосферы, характера и определенного духа через последовательные акценты, драматизм, декоративную насыщенность в функциональном контексте современного дома. К слову, такой разбор аналогов является фундаментом пояснительной записи к дипломному проекту на пятом году обучения.

Если рассматривать статическое и динамическое начала в формировании архитектурного ансамбля, статическое относится к смысловой нагрузке готической образности (стрельчатые арки, кессонированные потолки, темные благородные тона, филенчатые панели), а динамическое усиливает эту идею через детали, в которых наглядно проявляется синтез истории, функции, искусства и авторской интерпретации. Такое внимание как к функциональной, так и к символической стороне каждой мелочи – показатель высокого уровня студенческой работы.

Моделирование проекта напоминает работу сценографа, когда по законам театрального, сценического пространства предметное наполнение (ружье, которое выстрелит) служит переводом эмоций, характеров или амплуа героев. Сюжетная интрига подкрепляется за счет эмоционального контраста (светлое и темное); здесь прием перевернутого мира, где мир злодеев, ведьм и вампиров вступает во взаимоотношение с миром нормальных, «правильных» людей, который в парадоксальном и ироническом смысле оказывается более страшным. И поскольку готика является мистическим переплетением острых стрельчатых конструкций, дематериализации света, цвета, камня и стекла, то и в пространстве, на «сцене», мы видим торжество вертикали над горизонталью, духа над материей, романтизма над мещанством.



Рис. 1. Дом семьи Аддамс: а) проект; б) общий вид гостевой зоны; в) оформление лестницы (проект выполнен студенткой 3 курса К. Туранской, преподаватель: Т. В. Лебедева (Смирнова), 2023 г., АРХиД ТИУ)  
Fig. 1. The Addams family house: a) the project; b) the general view of the guest area; c) the stair design (the project was carried out by a 3<sup>rd</sup> year student K. Turanskaia. A pedagogue: Tatiana V. Lebedeva (Smirnova), 2023, Institute of Architecture and Design, Industrial University of Tyumen)

На примере данного проекта можно четко проследить основные стадии ведения проекта – от разработки аналитического раздела до итоговой демонстрации (рис. 2). Ценность стадиального ведения работы студенческого проекта проявляется в следующем:

1. Постановка задачи структурирует проектное мышление студента. Выбор и конкретизация условий и сроков сдачи индивидуального задания создают рамки для осмыслинного творчества.
2. Теоретическая база становится инструментом. Изучение выбранного стилевого направления, просмотр специализированной литературы и поиск аналогичных проектных решений – это аналитический отбор смыслообразующих элементов. Студент обосновывает выбор цвета, материалов и фактур, соответствующих современному прочтению данной идеи. На этом этапе формируется художественный вкус и чувство стиля.
3. Эскизирование и демонстрационный планшет визуализируют и функциональное зонирование пространства, и подбор предметного наполнения, раскрывая суть художественной идеи. Студент аргументирует, насколько выбранные решения действительно работают как ансамбль, а не как набор «случайностей».

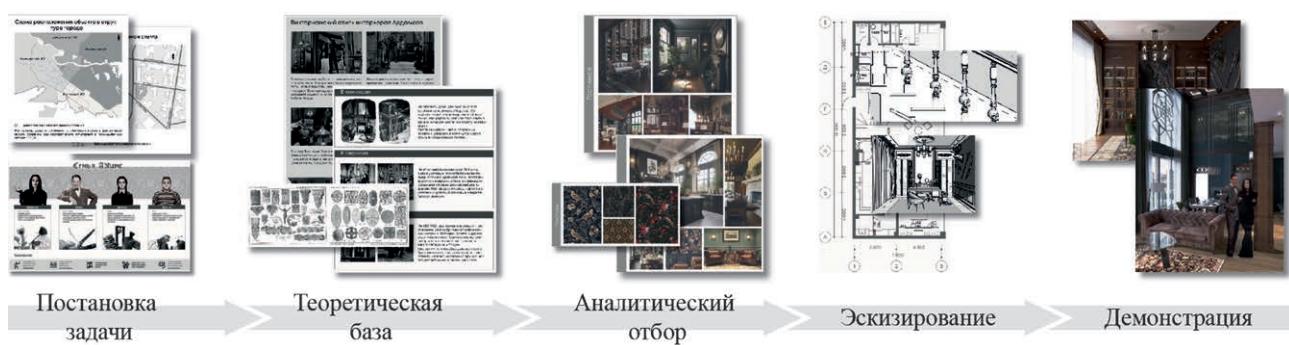


Рис. 2. Схема стадиального ведения работы на примере проекта дома семейства Аддамс (составлена авторами)

Fig. 2. The scheme of work stages based on the example of the Addams family house (scheme complied by the authors)

Эта последовательность превращает проектирование в аналог «вариации на тему», где именно творческая составляющая позволяет интерпретировать исходное задание на более сложном уровне. Современный интерьер не собирается подобно пазлам из отдельных смыслообразующих элементов, характеризующих определенный исторический стиль. Напротив, на основе анализа средовой ситуации происходит «сочинение» – поэтапное наращивание багажа знаний и компетенций с учетом структуры, ритмической организации и колористики.

Второй пример усложненного задания представляет проектирование интерьера в духе мастера, когда изобразительное искусство – картина, скульптура или гравюра – служит отправной точкой для стилизации. И созданное по мотивам творчества И. Билибина жилое пространство (рис. 3) выражает симпатии самого автора к выбранной им тематике, цель которой – «влюбить в себя» потенциального (вымышенного) заказчика.

Говоря о новизне проектного решения интерьера в русском стиле, необходимо отметить два вектора. Здесь должны присутствовать, во-первых, содержательная самобытность, отличная от традиционных решений, во-вторых – формальная, основанная на вкусе, цвете и мастерстве автора. Русский стиль так или иначе рассчитан на менталитет заказчика, который отождествляет себя с данной национальной традицией. И проявляется это чаще всего в декоративном пространственном наполнении. Студент не копирует напрямую, а обращается к стилизации исконных мотивов через ассоциативную цепочку, выстроенную на стилистических особенностях национальной культуры. Поэтому в качестве аналогового ряда здесь могут быть использованы образцы в духе русского мо-

дерна. Немаловажен и факт из современной нейронауки о том, что свойство восприятия искусства схоже с получением удовольствия от влюбленности; это всего лишь подтверждение необходимости включения в жилое пространство картин, фотографий и прикладных вещей [13]. Виньетки, орнаментальная плитка, наличник, ставший обрамлением зеркала, а также изголовье кровати в виде солнцеобразного павлиньего хвоста – все эти современные дизайнерские ходы подсознательно отсылают к народному представлению о счастье и красоте. Здесь видится сильная эмоциональная составляющая, подкрепленная многовековой народной аprobацией, традицией, которая не отождествляется со стагнацией. Напротив, это основа для вдохновения, проявления оригинального авторского подхода. Через подобное углубленное исследование региональной, местной культуры мы можем обнаружить богатые элементы и ценные смыслы, предлагая новые идеи для современного дизайна [14].

Так протягиваются нити памяти, оживляя ассоциации в цвете. Красный цвет несет множество значений: тепло, солнце и уют, сказку и победу добра – положительные эмоции, связывающие материальное и символическое. Однако цель проекта не в реконструкции русского модерна или буквальном цитировании мотивов серебряного века. Цель – воплотить характер и сущность билибинского подхода, его философию. Это достигается через символизм прошлого – через языческий красный; он здесь одновременно и оберег (языческое ощущение), и положительная эмоциональная база.

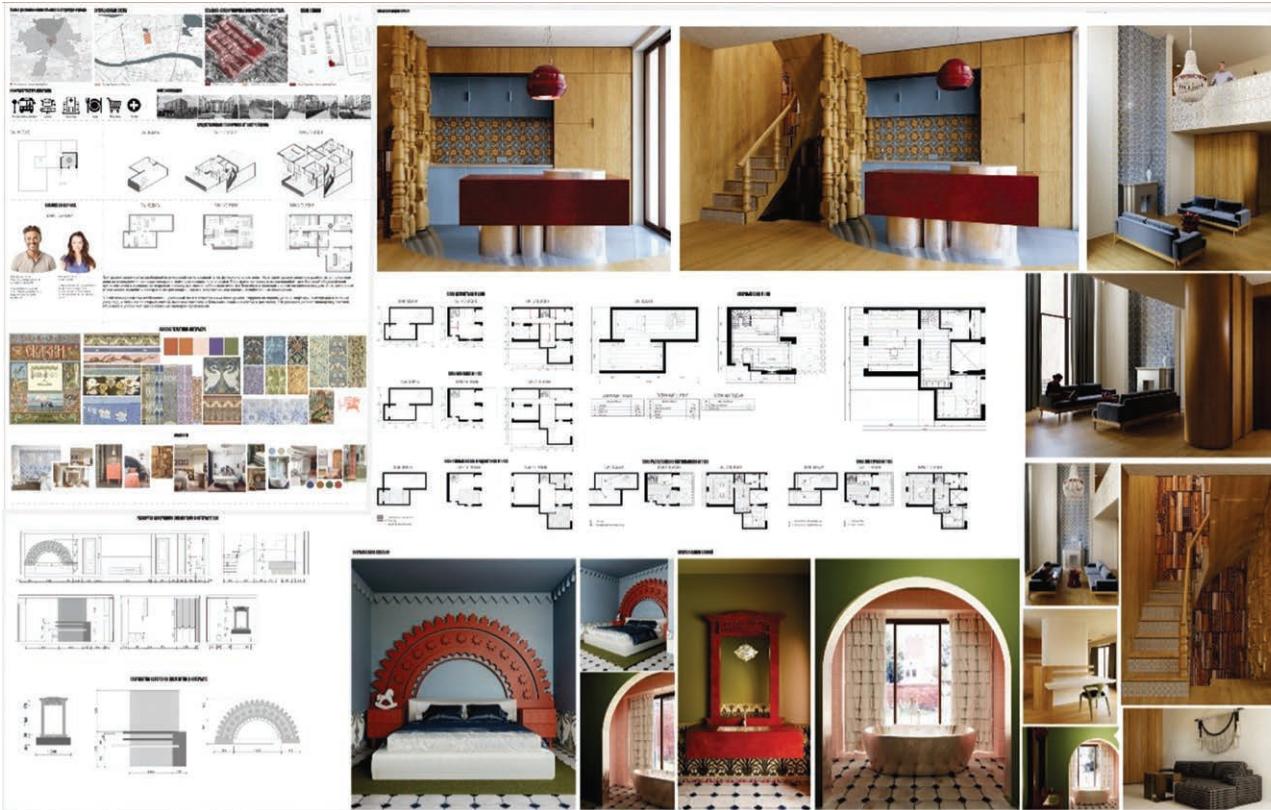
Особенность русского, сибирского, в частности, модерна – это любовь к дереву как к теплому, живому материалу. Деревянные срубы как дань русской традиции мы часто видим в иллюстрациях Билибина, но вместо ожидаемого горизонтального ритма срубной кладки мы получаем динамичную вертикаль, характерную для русских крылец и лестниц, русской архитектуры в целом с ее вертикалью, пирамидальностью, ступенчатостью.

При рассмотрении особенностей данного стиля на теоретической дисциплине был сделан акцент на разнице между стилизацией и стилизаторством, где не столько внешнее подражание и знание изобразительных и декоративных приемов, сколько сущностные характеристики «национального романтизма» становятся для мастеров приоритетными (М. Врубель, И. Билибин, Н. Рерих, С. Малютин, В. Васнецов, Е. Поленова). Для них декоративность в рамках народного искусства есть фактор синтеза и особенность мышления, но не скользящий, просто скопированный образец, «схематичный сколок». Большую помощь в данной аналитике оказывают задания, нацеленные на развитие у студентов самоконтроля: самостоятельный подбор материалов и научных статей по данной теме, посещение музеиных экспозиций, изучение репродукций и анализа живописных произведений знаменитых авторов, где исследуются техника письма, колорит, творческая манера самых ярких представителей определенного стиля, в данном случае русского модерна.

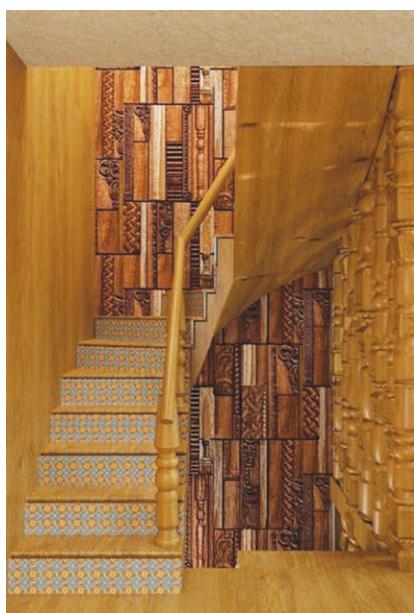
«Каждый стиль историчен по своей природе: он содержит в себе черты, наследуемые от предшествующих ему, равно как и черты, определяющие его последующую трансформацию. Умение четко разграничивать эти особенности позволяет не только не допускать досадные ошибки (попадание в проект "чужеродных" материалов, форм, нехарактерной компоновки мебели в пространстве), но и правильно "импровизировать" на заданную тему, демонстрируя уважительное и профессиональное отношение к прошлому» [14].

Интерьер – это отражение культуры человека, живущего в нем. Как отмечал Э. Соттасс, традиции нужно понимать шире – не как приемы, а как менталитет [16]. Здесь традиция проявляется не только в формальных и цветовых характеристиках пространства, но и в его поэтике, в способе отражения мировоззрения и ценностных систем. То, что обозначают как национальный культурный код, представляет собой линию преемственности, видимую в эволюции архитектурных стилей. Качество проектного исполнения в значительной мере определяется его встроенностю в этот исторических контекст – контекстуальной уместностью и устойчивостью [17].

a)



b)



c)



Рис. 3. Разработка интерьера жилого пространства в городе Тюмени. Европейский квартал: а) проект; б) оформление лестницы; в) вид спальни (проект выполнен студенткой 3 курса В. Нигматуллиной, преподаватель: Т. В. Лебедева (Смирнова), 2023 г., АРХиД ТИУ)

Fig. 3. Residential environment design in Tyumen. Evropeiskiy kvartal: a) the project; b) the stair design; c) the bedroom design (the project was carried out by a 3<sup>rd</sup> year student V. Nigmatullina. A pedagogue: Tatiana V. Lebedeva (Smirnova), 2023, Institute of Architecture and Design, Industrial University of Tyumen)

К моменту сбора аналитических данных и предпроектного анализа студент понимает: необходимо исследовать ежедневные потребности будущего жильца, его привычки и каждодневные ритуалы, чтобы впоследствии приступить к зонированию [18]. Любая проектная концепция подразумевает «фундамент», большая часть которого скрыта от заказчика в реальном проектировании, но это не отменяет колossalную работу по изучению аналогов и сбору идей, интерпретация которых на новом уровне делает автора востребованным, конкурентоспособным и свидетельствует о высоком уровне профессиональной подготовки. Функционал жилого пространства служит необходимой основой, но не исчерпывает его смысл, не исключает многовариантность его использования и художественного оформления. Студент, выполнивший следующую работу (рис. 4), поставил перед собой задачу: создать дизайн, соответствующий быту молодой современной семьи, но сохраняющий проверенные временем принципы жилого пространства – его замкнутость, целеустремленность одновременно с эмоционально-смысловой комбинацией.

В третьем проектном решении была сделана ставка на пространство,озвучное актуальным дизайнерским практикам, в котором бы узнавался опыт авангарда и модернизма в его декларативной функциональности. Интерьер минималистичен, а цвет используется только для создания акцентов. Эстетика «человеческой геометрии» Ле Корбюзье и выведенный из нее постулат, что «архитектура – это точная и великолепная игра освещенных форм»<sup>2</sup>, и подсказали, насколько важными для данного концепта станут свет и цвет. Концептуальное решение интерьера объединяет все комнаты в стилистически единый организм; а благодаря геометрическим формам и колористической гамме, перекликающимся с творчеством Пита Мондриана, новатора в области абстрактного искусства, зритель ощущает стремление к простоте и ясности. Здесь художественная система Мондриана сформировала устойчивый визуальный код, в котором баланс простейших элементов оказался эффективным инструментом организации визуального пространства. В проекте чувствуется присущее творчеству знаменитого художника стремление построить мост между духовным и материальным, философией и повседневностью [19].

И это не просто отсылка к узнаваемому стилю, но и демонстрация проектной культуры, где минимизация средств демонстрирует зрелость дизайнерского решения. Не случайно один из принципов модернизма, сформулированный Людвигом Мис ван дер Роэ, гласит: «Меньше – значит больше» (Less is more)<sup>3</sup>.

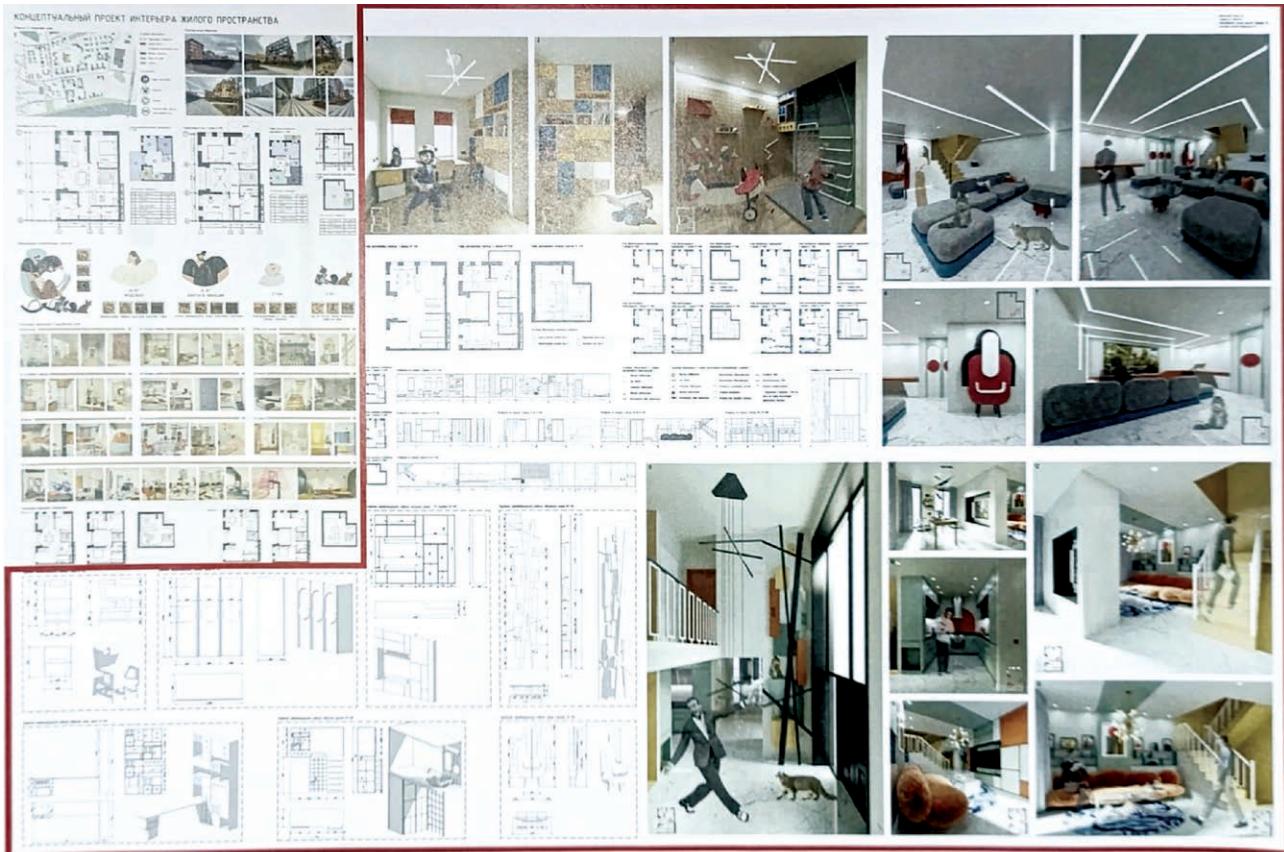
#### 4. Заключение / Conclusions

Изучение истории и эволюции интерьера на протяжении веков демонстрирует нам тонкие связи между предметным миром и миром людей, между формальными и содержательными категориями в философии жилой среды. Одновременно утилитарность и сакральность раскрывают дуалистическую природу материальной культуры, где каждый объект – материальное воплощение аксиологической системы общества [20]. Даже отдельно взятый предмет искусства несет на себе те же самые маркеры, что и интерьер в целом, в котором он должен бытывать, образуя синтез искусств, логические связи и колористические гармонии. Наработки студенческого багажа – овладение методами анализа и спецификой стилевого решения, моделирование ситуации выбора архитектурной формы и организации пространства – являются практической частью задания. В то время как гра-

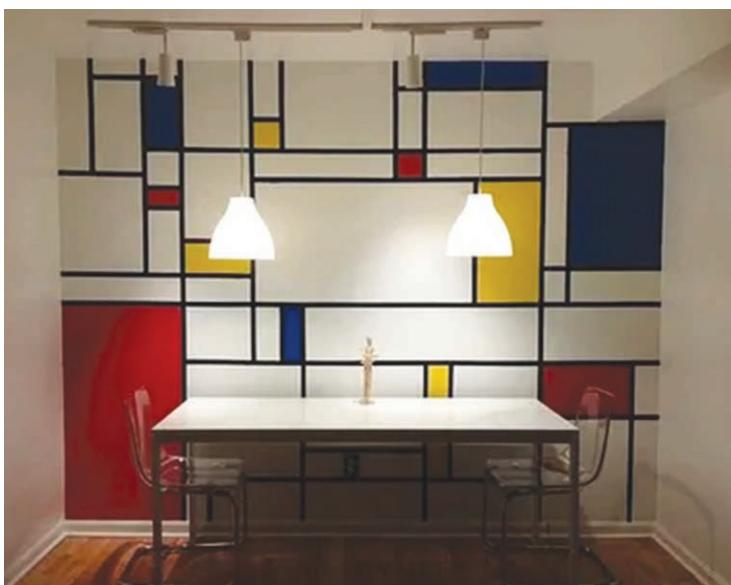
<sup>2</sup> Le Corbusier. *Towards a New Architecture*. London: John Rodker; 1927.

<sup>3</sup> Johnson Ph. C. *Mies van der Rohe*. New York: The Museum of Modern Art; 1947.

a)



b)



c)

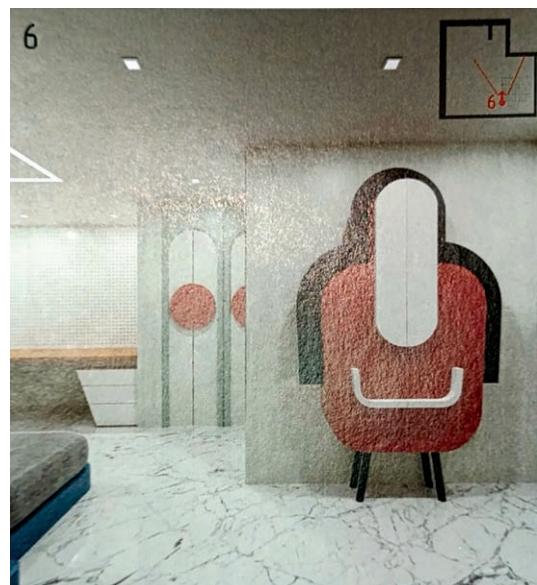


Рис. 4. Дом: а) проект; б, с) фрагменты интерьера (проект выполнен студенткой 3 курса А. Козко, преподаватель: Т. В. Лебедева (Смирнова), 2022 г., АРХиД ТИУ)

Fig. 4. House design: a) the project; b, c) interior fragments (the project was carried out by a 3<sup>rd</sup> year student A. Kozko. A pedagogue: Tatiana V. Lebedeva (Smirnova), 2022, Institute of Architecture and Design, Industrial University of Tyumen)

мотное и бережное отношение к архитектурному наследию как к первоисточнику является для обучающихся основой профессиональной культуры, ее этической составляющей.

Сложность интерьера как синтетического вида творчества заставляет студентов обращаться к широкому кругу источников: культурологическим и искусствоведческим трудам, сборникам орнаментов, энциклопедиям, справочникам прикладного искусства и т. д. Исследование стиля и формообразования интерьера жилища – задача, требующая также системного междисциплинарного подхода, включающего знания из области культурологии, философии, социологии, психологии, дизайна и искусствоведения.

Результаты исследования подтверждают эффективность реализации междисциплинарного подхода и позволяют решить все поставленные задачи.

1. Анализ студенческих работ показал, что предварительное изучение истории стилей, понимание философского содержания, культурного контекста и мировоззрения эпохи и умение применять эти знания функционально существенно повышает качество проектных решений. Подобный синтез интерьерного и историко-стилевого анализа может стать основой для формирования не просто компетентного дизайнера, но субъекта культуры, способного читать, интерпретировать и создавать знаковые среды.
2. Продемонстрирован педагогический опыт: успешность междисциплинарного подхода, основанного на параллельном преподавании двух дисциплин, теоретической и практической, подтверждается высоким качеством представленных работ.
3. Третья задача была реализована через демонстрацию методики – поэтапных теории, анализа и синтеза – на примере трех студенческих проектов, каждый из которых демонстрирует, как предпроектный анализ, сознательный выбор приемов и воплощение на уровне деталей приводят к созданию цельного и грамотного решения.

Таким образом, исследование подтвердило, что междисциплинарный подход является необходимым элементом формирования профессиональной культуры архитектора. В настоящее время студенты направления ДАС чаще обращаются к минимализму и теме экологии, избегая неоисторических версий, требующих углубленного знания и опыта как в теоретической, так и в практической части. Проектные решения с применением приемов исторической стилизации позволяют наглядно показать сильные и слабые стороны обучающегося и обозначить направления для приложения наибольших творческих усилий.

Синтез исторической грамотности и реального проектирования – это современная профессиональная парадигма, подход к формированию профессиональной культуры архитектора. Потенциал данной методологии выходит за рамки одного учреждения: ее апробация в других учреждениях позволит выявить универсальные принципы и культурно-специфические адаптации.



**Вклад авторов.** Костко О. Ю.: научное руководство, разработка общей концепции и методологии исследования, формулировка основных положений о роли изучения истории архитектуры и искусства в развитии профессиональных компетенций. Смирнова Т. В.: анализ учебного процесса, методическое сопровождение студенческих проектов, формулировка педагогических принципов интеграции теории и практики при проектировании интерьеров. Туранская К. А.: структурирование исследования, сбор и анализ научной литературы, общее редактирование текста, описание практических примеров на основе личного опыта участия в учебном процессе.

**Author contributions.** Oksana Yu. Kostko: scientific supervision, development of the overall concept and methodology of the study, formulation of the core statements regarding the role of studying the history of architecture and art in the development of professional competencies. Tatiana V. Smirnova: analysis of the educational process, methodological support for student projects, formulation of pedagogical principles for integrating theory and practice in interior design. Karolina A. Turanskaia: structuring the study, scientific

literature review, general text editing, and description of practical examples based on personal experience of participation in the educational process.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Makbulenur Onur. Integration of vegetative elements into design and conceptual planning: an analysis through a studio experience. *International refereed journal of design and architecture*. 2025;34:24–43. <https://doi.org/10.17365/TMD.2024.TURKEY.34.02>
2. Higuera-Trujillo J. L., Llinares C., Macagno E. The cognitive-emotional design and study of architectural space: a scoping review of neuroarchitecture and its precursor approaches. *Sensors*. 2021;21(6):2193. <https://doi.org/10.3390/s21062193>
3. Kato Nabirye H. The impact of architecture on urban spaces and community interaction. *Research Output Journal of Education*. 2024;4(3):17–20. <https://doi.org/10.59298/ROJE/2024/431720>
4. Dong J., Ran M. The application and effectiveness of interdisciplinary integration education in teaching interior design and environmental design. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024;9(1):1–18. <https://doi.org/10.2478/amns-2024-2730>
5. Ali Berkay Avci, Şefika Gülin Beyhan. A case study on experiential learning in architecture: accessible, climate-responsive, and flexible house designs. *EMARA Indonesian Journal of Architecture*. 2023;8(1):14–21. <https://doi.org/10.29080/eija.v8i1.1654>
6. Muxing Gao, Xiaoxiao Cao, Lihuai Qian. Cultural echoes in modern design: assessing young consumers' perceptions of traditional bamboo weaving patterns. *Complexity*. 2024;2024(1):1–11. <https://doi.org/10.1155/2024/5524490>
7. Плеханова В. А., Коноплева Н. А. *Стиль и формообразование интерьера жилища в советский и постсоветский периоды как опыт эстетизации повседневности*. Москва: Директ-Медиа, 2022. 332 с. ISBN: 978-5-4499-2854-2
8. Antonini E., Gaspari J., Visconti C. Collaborative learning experiences in a changing environment: innovative educational approaches in architecture. *Sustainability*. 2021; 13(16):8895. <https://doi.org/10.3390/su13168895>
9. Maiorova I. M., Fahrutdinova R. A., Fahrutdinov R. R., Kamashova Yu. L. The development of the visual culture of design students in shaping the spatial environment. *Revista San Gregorio*. 2019;(36):331–339. URL: [https://www.researchgate.net/publication/338258150\\_The\\_development\\_of\\_the\\_visual\\_culture\\_of\\_design\\_students\\_in\\_shaping\\_the\\_spatial\\_environment](https://www.researchgate.net/publication/338258150_The_development_of_the_visual_culture_of_design_students_in_shaping_the_spatial_environment)
10. Некрасова М. А. (ред.) *Искусство ансамбля: Художественный предмет. Интерьер. Архитектура. Среда*. Москва: Изобразительное искусство; 1988. 462 с.
11. Gregory P. Architecture as (Lived) Experience. *ARPHA Proceedings*. 2024;7:190–194. <https://doi.org/10.3897/ap.7.e0190>
12. Lee K. The interior experience of architecture: an emotional connection between space and the body. *Buildings*. 2022;12(3):326. <https://doi.org/10.3390/buildings12030326>
13. Ishizu T., Zeki S. Toward a brain-based theory of beauty. *PLOS One*. 2011;6(7):e21852. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021852>
14. Qiong Wang. The application and innovation of regional cultural elements in modern interior design. *Art and Performance Letters*. 2024;5(2):40–45. <http://dx.doi.org/10.23977/artpl.2024.050207>
15. Поняев А. Н. Методология создания интерьера для улучшения психоэмоционального состояния и mentalityного здоровья человека. *Актуальные исследования*. 2023;51(181). URL: <https://apni.ru/article/7875-metodologiya-sozdaniya-interera-dlya>
16. Шимко В. Т. *Архитектурно-дизайнерское проектирование. Основы теории (средовой подход)*. Москва: Архитектура-С; 2009. 408 с.
17. Ceylan S. The influence of historical context on architectural design: a retrospective analysis of student work. *World Transactions on Engineering and Technology Education*. 2023;21(3):205–210. URL: [https://wiete.com.au/journals/WTE&TE/Pages/TOC\\_V21N3.html](https://wiete.com.au/journals/WTE&TE/Pages/TOC_V21N3.html)
18. Глазычев В. Л. *Дизайн как он есть*. Москва: Книжный дом «Университет»; 2013. 320 с. ISBN: 978-5-906226-36-5, 978-5-9739-10066-5

19. Люй Л. Культурный код универсализма: неопластицизм Пита Мондриана как визуальная философия модерна. *Культура и искусство*. 2025;(9):38–47. <https://doi.org/10.7256/2454-0625.2025.9.76032>
20. Klimenko I., Berdnik T. Meaning, function and design of object in culture. *Postmodern Openings*. 2018;9(2):110–119. <https://doi.org/10.18662/po/22>

#### References

1. Makbulenur Onur. Integration of vegetative elements into design and conceptual planning: an analysis through a studio experience. *International refereed journal of design and architecture*. 2025;34:24–43. <https://doi.org/10.17365/TMD.2024.TURKEY.34.02>
2. Higuera-Trujillo J. L., Llinares C., Macagno E. The cognitive-emotional design and study of architectural space: a scoping review of neuroarchitecture and its precursor approaches. *Sensors*. 2021;21(6):2193. <https://doi.org/10.3390/s21062193>
3. Kato Nabiry H. The impact of architecture on urban spaces and community interaction. *Research Output Journal of Education*. 2024;4(3):17–20. <https://doi.org/10.59298/ROJE/2024/431720>
4. Dong J., Ran M. The application and effectiveness of interdisciplinary integration education in teaching interior design and environmental design. *Applied Mathematics and Nonlinear Sciences*. 2024;9(1):1–18. <https://doi.org/10.2478/amns-2024-2730>
5. Ali Berkay Avcı, Şefika Gülin Beyhan. A case study on experiential learning in architecture: accessible, climate-responsive, and flexible house designs. *EMARA Indonesian Journal of Architecture*. 2023;8(1):14–21. <https://doi.org/10.29080/eija.v8i1.1654>
6. Muxing Gao, Xiaoxiao Cao, Lihuai Qian. Cultural echoes in modern design: assessing young consumers' perceptions of traditional bamboo weaving patterns. *Complexity*. 2024;2024(1):1–11. <https://doi.org/10.1155/2024/5524490>
7. Plehanova V. A., Konoplyova N. A. *The style and form-making of housing interiors in the Soviet and post-Soviet periods as an experience in the aestheticization of everyday life*. Moscow: Direct-Media; 2022. (In Russ.) ISBN: 978-5-4499-2854-2
8. Antonini E., Gaspari J., Visconti C. Collaborative learning experiences in a changing environment: innovative educational approaches in architecture. *Sustainability*. 2021;13(16):8895. <https://doi.org/10.3390/su13168895>
9. Maiorova I. M., Fahrutdinova R. A., Fahrutdinov R. R., Kamasheva Yu. L. The development of the visual culture of design students in shaping the spatial environment. *Revista San Gregorio*. 2019;(36):331–339. URL: [https://www.researchgate.net/publication/338258150\\_The\\_development\\_of\\_the\\_visual\\_culture\\_of\\_design\\_students\\_in\\_shaping\\_the\\_spatial\\_environment](https://www.researchgate.net/publication/338258150_The_development_of_the_visual_culture_of_design_students_in_shaping_the_spatial_environment)
10. Nekrasova M. A. (eds.) *Art of the Ensemble: Artistic Object. Interior. Architecture. Environment*. Moscow: Izobrazitel'noye iskusstvo; 1988. (In Russ.)
11. Gregory P. Architecture as (Lived) Experience. *ARPHA Proceedings*. 2024;7:190–194. <https://doi.org/10.3897/ap.7.e0190>
12. Lee K. The interior experience of architecture: an emotional connection between space and the body. *Buildings*. 2022;12(3):326. <https://doi.org/10.3390/buildings12030326>
13. Ishizu T., Zeki S. Toward a brain-based theory of beauty. *PLOS One*. 2011;6(7):e21852. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0021852>
14. Qiong Wang. The application and innovation of regional cultural elements in modern interior design. *Art and Performance Letters*. 2024;5(2):40–45. <http://dx.doi.org/10.23977/artpl.2024.050207>
15. Ponyaev A. N. Methodology for creating interiors to improve a person's psycho-emotional state and mental health. *Aktual'nye issledovaniya*. 2023;51(181). (In Russ.) URL: <https://apni.ru/article/7875-metodologiya-sozdaniya-interera-dlya>
16. Shimko V. T. *Architectural and design project planning. fundamentals of theory (environmental approach)*. Moscow: Architectura-S; 2009. (In Russ.)
17. Ceylan S. The influence of historical context on architectural design: a retrospective analysis of student work. *World Transactions on Engineering and Technology Education*. 2023;21(3):205–210. URL: [https://wteite.com.au/journals/WTE&TE/Pages/TOC\\_V21N3.html](https://wteite.com.au/journals/WTE&TE/Pages/TOC_V21N3.html)
18. Glazychev V. L. *Design as it is*. Moscow: Knizhnyj dom "Universitet"; 2013. (In Russ.) ISBN: 978-5-906226-36-5, 978-5-9739-10066-5

19. Lyu L. The code of universalism in culture: neoplasticism by Piet Mondrian as a visual philosophy of the modern age. *Culture and Art*. 2025;(9):38–47. (In Russ.) <https://doi.org/10.7256/2454-0625.2025.9.76032>
20. Klimenko I., Berdnik T. Meaning, function and design of object in culture. *Postmodern Openings*. 2018;9(2):110–119. <https://doi.org/10.18662/po/22>

### Информация об авторах

**Костко Оксана Юрьевна**, доцент кафедры дизайна архитектурной среды, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, oksandra-muz@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5203-7926>

**Смирнова Татьяна Валерьевна**, доцент кафедры дизайна архитектурной среды, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, tatyana.seagull@inbox.ru

**Туранская Каролина Андреевна**, архитектор, Центр архитектурной подготовки, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, turanskaya02@inbox.ru

### **Information about the authors**

**Oksana Yu. Kostko**, Associate Professor in the Department of Architectural Environment Design, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, oksandra-muz@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0005-5203-7926>

**Tatiana V. Smirnova**, Associate Professor in the Department of Architectural Environment Design, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, tatyana.seagull@inbox.ru

**Karolina A. Turanskaia**, Architect in the Architectural Training Center, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, turanskaya02@inbox.ru

Получена 01 ноября 2025 г., одобрена 02 декабря 2025 г., принята к публикации 10 декабря 2025 г.

Received 01 November 2025, Approved 02 December 2025, Accepted for publication 10 December 2025



## Расчет несущей способности многощелевых фундаментов

О. А. Богомолова<sup>1</sup>✉, С. А. Богомолов<sup>2</sup>, Н. А. Богомолов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Волгоградский государственный технический университет

Волгоград, Проспект им. В. И. Ленина, 28, 400005, Российская Федерация

<sup>2</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
Москва, Ярославское шоссе, 26, 129337, Российская Федерация

✉ [boazaritcyn@mail.ru](mailto:boazaritcyn@mail.ru)



**Аннотация.** Приведены результаты расчетов несущей способности двух- и трехщелевого фундаментов на однородном основании, выполненных при помощи компьютерной программы FEA, в которой формализован метод конечных элементов. По результатам расчетов дана оценка влияния различных факторов (глубины заложения фундамента, межщелевого расстояния, коэффициента бокового давления вмещающего грунта) на напряженное состояние грунта и процесс развития кулоновских областей пластических деформаций. Расчеты выполнены при величине отношения модуля упругости железобетона к модулю деформации грунта, которое равно  $10^3$ , что соответствует его реальному значению. Показано, что применение трехщелевого Ш-образного фундамента является нецелесообразным ввиду того, что при прочих равных условиях он проигрывает двухщелевому П-образному фундаменту и по несущей способности, и по осадкам. Анализ результатов сопоставительных расчетов показал, что численные значения величины несущей способности основания двухщелевого фундамента, вычисленные на основе рекомендаций СНиП и СП, могут быть получены на основе вычислений по программе FEA при некоторых значениях коэффициента бокового давления грунта. Сделано предположение, что компьютерная программа FEA может быть рекомендована для использования при соответствующих расчетах.

**Ключевые слова:** метод конечных элементов, щелевые фундаменты, напряженное состояние основания, области пластических деформаций, физико-механические свойства грунта и железобетона, несущая способность

**Для цитирования:** Богомолова О. А., Богомолов С. А., Богомолов Н. А. Расчет несущей способности многощелевых фундаментов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):24–35. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-24-35> EDN: BFYILD

## Calculation of bearing capacity for multi-slot foundations

Oksana A. Bogomolova<sup>1</sup>✉, Sergey A. Bogomolov<sup>2</sup>, Nikita A. Bogomolov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Volgograd State Technical University

Volgograd, 28 Lenin Avenue, 400005, Russian Federation

<sup>2</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
Moscow, 26 Yaroslavskoe Shosse, 129337, Russian Federation

✉ [boazaritcyn@mail.ru](mailto:boazaritcyn@mail.ru)

**Abstract.** This article presents the calculation results of the bearing capacity of two- and three-slot foundations on a homogeneous base, performed using the FEA computer program, which implements the finite element method. Based on these results, the influence of various factors (foundation embedment depth, distance between the slots, and the lateral earth pressure coefficient of the surrounding soil) on the soil's stress state and the development of Coulomb plastic deformation zones was assessed. The calculations were performed with a ratio of the reinforced concrete's modulus of elasticity to the soil's modulus of deformation equal to  $10^3$ , which, as demonstrated in the work, corresponds to a realistic value. It was shown that the use of a three-slotted Ш-shaped foundation is not advisable because it is inferior to a two-slotted Π-shaped foundation in both bearing capacity and settlement, under otherwise equal conditions. Analysis of the comparative calculation results indicated that the numerical values of the bearing capacity for a two-slot foundation, calculated according to SNiP and SP recommendations, can be reproduced using the FEA program for specific values of the lateral soil pressure coefficient. Consequently, the FEA computer program is recommended for use in relevant calculations.

**Keywords:** finite element method, slot-type foundations, stress state of the base, plastic deformation zones, physical and mechanical properties of soil and reinforced concrete, bearing capacity

**For citation:** Bogomolova O. A., Bogomolov S. A., Bogomolov N. A. Calculation of bearing capacity for multi-slot foundations. *Architecture, Construction, Transport.* 2025;5(4):24–35. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-24-35>

## 1. Введение / Introduction

Щелевые фундаменты работают как сложные конструкции, состоящие из буроинъекционных стен в грунте и защемленного в межщелевом пространстве грунта, находящегося в естественном состоянии. Стены в грунте (щели) объединяются плитным ростверком и образуют некое подобие короба, перевернутого вверх дном. Известно, что такие конструкции характеризуются большей несущей способностью и меньшими по величине осадками, нежели отдельные группы свай и плиты, что объясняется существенно развитой боковой поверхностью, за счет чего увеличиваются соответствующие силы трения и сцепления, и включением в работу заключенного в межщелевом пространстве грунта.

Работе щелевых фундаментов посвящено множество исследований, одними из первых были Е. А. Сорочан [1–3], В. В. Павлов [4], В. М. Зубков [5]. Результаты исследований на праяненно-деформированного состояния, процесса развития пластических областей и осадок щелевых фундаментов представлены в работах С. В. Платоновой [6, 7], Л. А. Бартоломея и О. А. Богомоловой с соавторами [8, 9]. Х. Брандтль [10] и В. П. Петров [11] рассматривали вопросы передачи через щелевые фундаменты сверхбольших и, наоборот, малых нагрузок. В. С. Уткин и О. Л. Борисов [12] рассматривали расчет надежности щелевого фундамента на стадии эксплуатации, а Д. Н. Банников – расчет мелкозаглубленных ленточных щелевых фундаментов по двум группам предельных состояний [13].

Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвященных щелевым фундаментам, и наличие руководств и рекомендаций по их проектированию (Строительные правила Республики Беларусь, СП Российской Федерации, Рекомендации по проектированию и строительству щелевых фундаментов и т. д.), существуют вопросы по их расчету. Например, ни один из методов и подходов к расчету несущей способности щелевых фундаментов не учитывает величину коэффициента бокового давления грунта и жесткость фундамента.

В настоящей статье предложен подход к решению задачи о несущей способности основания щелевого фундамента с использованием компьютерной программы FEA, в которой formalизован метод конечных элементов (МКЭ) [14]. Применение данного метода для решения различных инженерных и научных задач широко рассматривается в отечественной и зарубежной литературе, однако авторам не удалось отыскать работ ученых, посвященных FEM-моделированию напряжен-

ного состояния и несущей способности оснований щелевых фундаментов, подобных рассмотренным в статье.

Для того, чтобы обосновать возможность использования МКЭ в качестве инструмента данного исследования, необходимо показать, что с его помощью можно учесть всю совокупность расчетных параметров, которые оказывают влияние на напряженное состояние грунтового массива и, как следствие, на процесс образования и развития областей пластических деформаций в активной зоне фундамента. В качестве переменных параметров при проведении численных исследований приняты: глубина заложения фундамента  $h$ , ширина фундамента  $2b$ , физико-механические свойства грунта – угол внутреннего трения  $\varphi$ , удельное сцепление  $c$ , объемный вес  $\gamma$ , коэффициент бокового давления  $\xi_o$  и модуль деформации грунта  $E_o$ , коэффициент Пуассона  $\nu$  и модуль упругости материала фундамента (железобетон)  $E$ , величина интенсивности равномерно распределенной нагрузки  $q$ . В качестве обобщенных параметров используются: приведенное давление связности  $\sigma_{ce} = c(\gamma htg\varphi)^{-1}$  и отношение модуля упругости железобетона и модуля деформации грунта основания  $n = \frac{E}{E_o}$ . Для примера рассмотрен расчет несущей способности основания двухщелевого фундамента.

Кроме того, проведено сопоставление результатов, полученных на основании предложенного подхода, с результатами, полученными другими расчетными методами, в том числе с использованием рекомендованных нормативных документов.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Расчет по несущей способности – это прочностной расчет, поэтому важно знать, как меняется напряженное состояние основания в зависимости от тех или иных факторов. Для анализа процесса распределения напряжений в активной зоне щелевого фундамента воспользуемся компьютерной программой [14], в которой formalизован метод конечных элементов [15, 16].

На рис. 1 изображены фрагменты расчетных конечно-элементных схем двухщелевого и трехщелевого фундаментов одинаковой глубины заложения, у которых плиты и щели имеют равную толщину. На схемы наложены граничные условия, рекомендованные в работе [17].

Линейные размеры расчетной схемы двухщелевого фундамента  $8b \times 6b$  ( $b$  – полуширина фундамента), она состоит из 115 200 одинаковых по форме и размеру треугольных конечных элементов, сопряженных в 58 362 узлах; ширина матрицы жесткости системы составляет 246. Размеры расчетной схемы трехщелевого фундамента  $8b \times 8b$ , она состоит из 20 340 одинаковых треугольных элементов, сопряженных в 40 000 узлах, ширина матрицы жесткости системы – 206.

Как видно, степень дискретизации расчетной схемы основания трехщелевого фундамента существенно ниже, но, как нами было установлено, при однородной разбивке схемы (конечные элементы одинакового размера и формы) это практически не сказывается на точности и достоверности получаемого результата.

При расчете в качестве примера принято, что основание сложено однородным суглинком, физико-механические свойства которого имеют следующие значения:  $\gamma = 18 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 25^\circ$ ;  $c = 37 \text{ кПа}$ ;  $\xi_o = 0.41$ ;  $E_o = 34 \text{ МПа}$  [20]. Фундамент выполнен из бетона класса B30,  $\gamma_b = 22.9 \text{ кН/м}^3$ ,  $\nu_b = 0.18$ ,  $E_b = 32.5 \cdot 10^3 \text{ МПа}$  (СП 63.13330.2018<sup>1</sup>),  $h = 2b = 1 \text{ м}$ .

<sup>1</sup> СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения = Concrete and reinforced concrete structures. General provisions: утвержден Приказом Министерства строительства и ЖКХ РФ от 19 декабря 2018 г. № 832/пр: введен в действие с 20 июня 2019 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/554403082> (дата обращения: 07.06.2025).

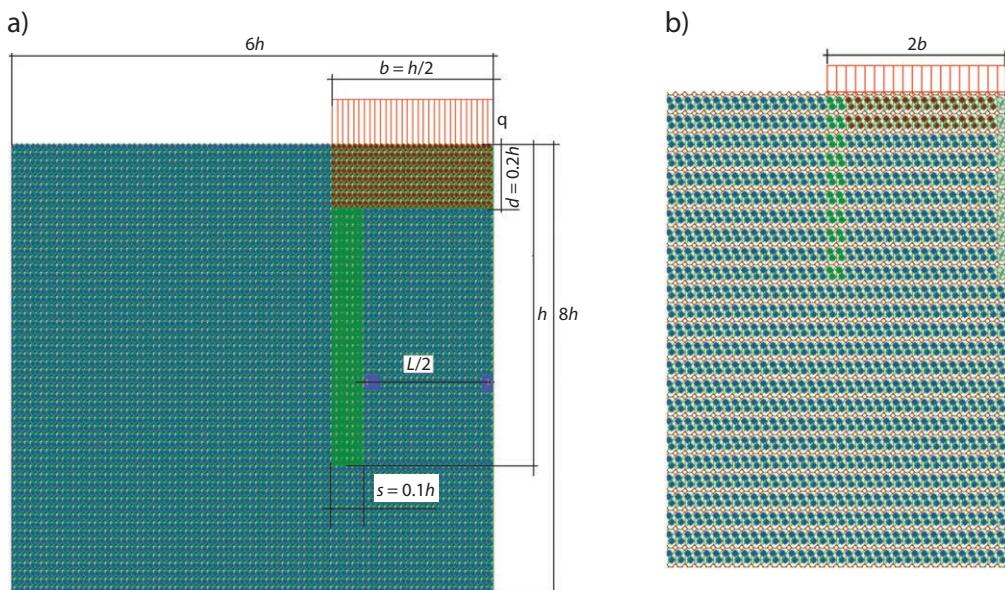


Рис. 1. Фрагменты расчетных конечно-элементных схем фундаментов: а) двухщелевого; б) трехщелевого (размеры даны в долях глубины заложения фундамента  $h$ , схемы изображены в разных масштабах) [19]  
 Fig. 1. Fragments of the FEM analysis models for the foundations: a) two-slot; b) three-slot (dimensions are given in fractions of the foundation depth  $h$ ; the models are shown in different scales) [19]

Необходимо отметить, что при таких значениях модуля деформации грунта  $E_o$  и модуля упругости бетона  $E_b$  реальное отношение этих величин равно  $32\ 500/34 = 956 = 10^{2.98} \approx 10^3$ , то есть  $n \approx 3$ . Именно при таком значении  $n$  выполнены все расчеты и именно этому значению  $n$  соответствуют все графики, приведенные ниже в статье (рис. 2–4).

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

В опубликованных ранее работах (в частности, в [18, 19] и других) авторами рассмотрены вопросы распределения напряжений в активной зоне одно-, двух- и трехщелевых фундаментов и влияния переменных расчетных параметров на процесс образования и развития областей пластических деформаций. Приведем результаты, не вошедшие в упомянутые выше работы и иллюстрирующие влияние различных переменных расчетных параметров на величину предельно допустимой нагрузки. Напомним, что величина предельно допустимой нагрузки определяется из условия смыкания пластических областей под фундаментом, а грунт основания считается однородным и изотропным.

На рис. 2 приведены графические зависимости вида  $q_{nd} = f(h/b)$ ;  $q_{nd} = f(2b/h)$  и  $q_{nd} = f(\xi_o)$ , построенные по результатам численных расчетов. Их анализ говорит о том, что для условий рассмотренных примеров увеличение отношения  $h/b$  влечет за собой увеличение предельной нагрузки по линейному закону; увеличение отношения  $2b/h$  приводит к снижению величины  $q_{nd}$  по логарифмическому закону, а увеличение численного значения коэффициента бокового давления вызывает рост предельной нагрузки по экспоненциальному закону.

На рис. 3 в качестве примера приведены кривые, описывающие функциональную зависимость относительной глубины развития пластических областей  $\Delta Z/h$  под подошвой двухщелевого фундамента от величины интенсивности внешней равномерно распределенной нагрузки. Анализ этих кривых показывает, что с точностью до 99 % они аппроксимируются полиномом второй степени. Чем больше величина приведенного давления связности и величина угла внутреннего трения слагающего грунта, тем медленнее происходит развитие пластических областей, что вполне естественно.

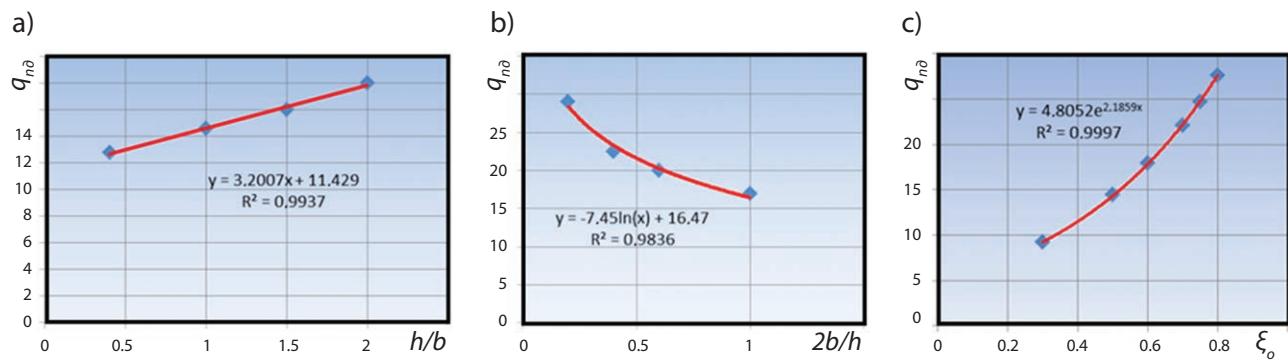


Рис. 2. Графики зависимости предельной нагрузки:  
a)  $q_{n0} = f(h/b)$ ; b)  $q_{n0} = f(2b/h)$ ; c)  $q_{n0} = f(\xi_0)$  (графики построены авторами)  
Fig. 2. Plots of the ultimate load dependence: a)  $q_{n0} = f(h/b)$ ;  
b)  $q_{n0} = f(2b/h)$ ; c)  $q_{n0} = f(\xi_0)$  (plots constructed by the authors)

При проведении вычислений нагрузка увеличивалась до момента смыкания областей пластических деформаций. Таким образом, координаты конечных точек этих кривых определяют величины предельно допустимой нагрузки и максимальную глубину развития пластических областей.

В качестве еще одного примера на рис. 4 изображены графические аппроксимации зависимости увеличения относительной высоты  $L/h$  областей пластических деформаций, зародившихся под краями щелевого фундамента и развивающихся вверх от его низа вдоль внешних сторон щелей, от величины интенсивности внешнего воздействия. Как и в предыдущем случае, полученные кривые с точностью почти в 100 % аппроксимируются полиномами второй степени.

Анализ результатов проведенных авторами расчетов и их графических аппроксимаций, часть которых приведена на рис. 2–4, позволяет утверждать, что применение компьютерной программы FEA [14], в которой формализован метод конечных элементов, позволяет не только анализировать процесс распределения напряжений в активной зоне щелевого фундамента, но и определять его несущую способность, рассматривая момент смыкания пластических областей под подошвой фундамента как критерий ее исчерпывания.

Для трехщелевого фундамента выполнены аналогичные расчеты, результаты которых качественно полностью совпадают с результатами расчетов для двухщелевого фундамента, что подтвердило предположение о возможности определения критических нагрузок исходя из степени развития пластических областей.

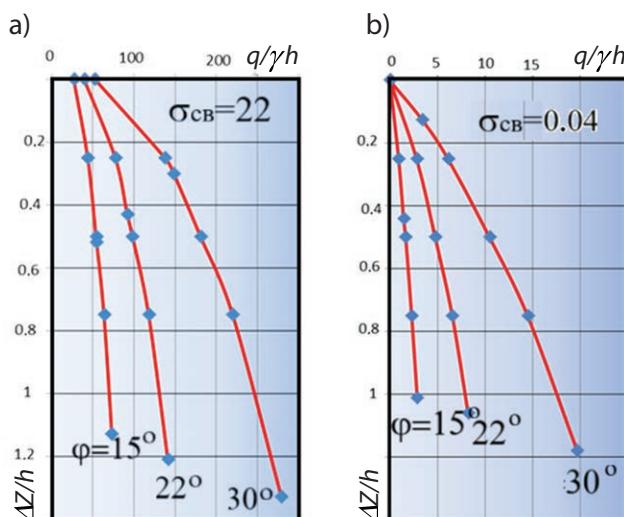


Рис. 3. Графические зависимости глубины развития пластических областей под подошвой двухщелевого фундамента от величины интенсивности равномерно распределенной нагрузки при  
a)  $\sigma_{cw} = 22$ ; b)  $\sigma_{cw} = 0.04$  (графики построены авторами)  
Fig. 3. Graphical dependencies of the depth of plastic zones development under the base of a two-slot foundation on the intensity of the uniformly distributed load at: a)  $\sigma_{cw} = 22$ ; b)  $\sigma_{cw} = 0.04$  (plots constructed by the authors)

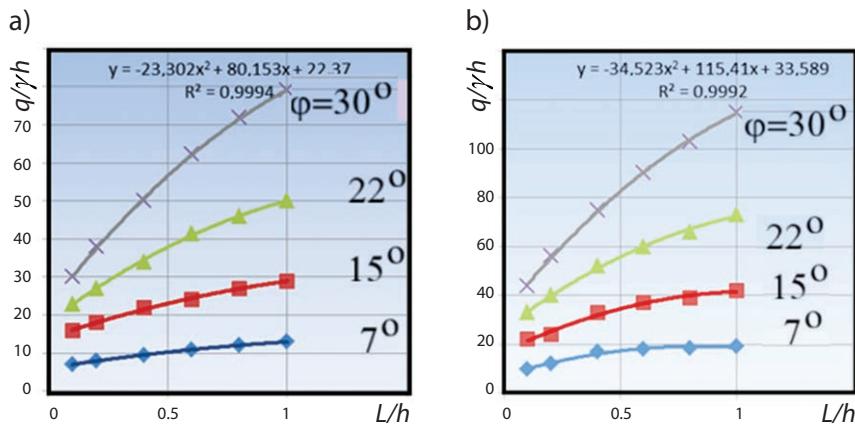


Рис. 4. Графики зависимости высоты областей пластических деформаций  $L$ , развивающихся от подошвы вверх по внешним плоскостям щелей, от величины внешней равномерно распределенной нагрузки при  $b/h = 0.625$  для а)  $\sigma_{c6} = 7$ ; б)  $\sigma_{c6} = 15$  (графики построены авторами)  
 Fig. 4. Plots of the dependence of the plastic deformation zones  $L$  height, developing from the base upwards along the external slot planes, on the magnitude of the external uniformly distributed bearing capacity at  $b/h = 0.625$  for а)  $\sigma_{c6} = 7$ ; б)  $\sigma_{c6} = 15$  (plots constructed by the authors)

По результатам расчетов для двух- и трехщелевых фундаментов построены графические зависимости вида  $q_{n\partial} = f(n)$  и  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , где  $n$  – показатель степени в выражении  $\frac{E_6}{E_0} = 10^n$ . Из рис. 5а видно, что зависимость  $q_{n\partial} = f(n)$  аппроксимируется прямой линейной зависимостью, а зависимость  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$  – экспонентой.

Главным выводом, который можно сделать на основании выполненных расчетов, является то, что трехщелевые фундаменты при всех прочих равных условиях не превосходят двухщелевые ни по несущей способности, ни по осадкам при условии, что мощность сжимаемой толщи в обоих случаях одинакова. Это четко видно из анализа графических аппроксимаций, представленных на рис. 5. Кроме того, трехщелевой фундамент при всех прочих равных условиях более материалоемок и трудозатратен.

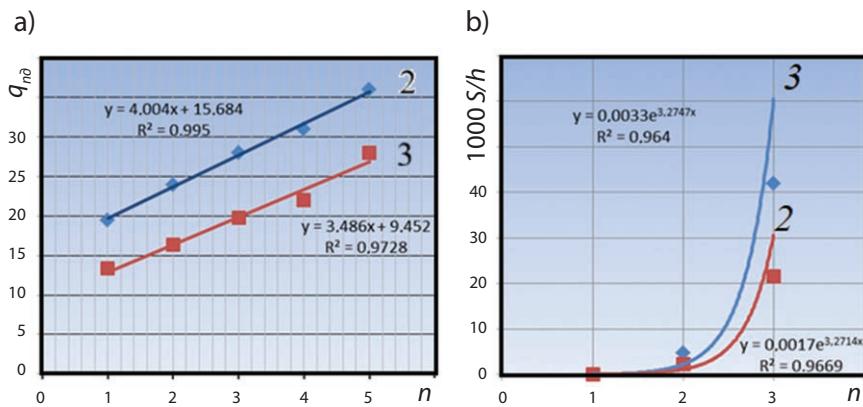


Рис. 5. Графические зависимости вида а)  $q_{n\partial} = f(n)$ ; б)  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , построенные для двух- (2) и трехщелевого (3) фундаментов (графики построены авторами)  
 Fig. 5. Graphical dependencies of the form а)  $q_{n\partial} = f(n)$ ;

б)  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , plotted for two-slot (2) and three-slot (3) foundations (plots constructed by the authors)

Для подтверждения достоверности получаемых авторами значений величины предельно допустимой нагрузки на основание двухщелевого фундамента выполнены расчеты по определению этой нагрузки при помощи методики, приводимой в СНиП 2.02.01-83<sup>2</sup> и СП 22.13330.2016<sup>3</sup>, с помощью метода, изложенного в работе Д. Н. Банникова [13] и при помощи компьютерной программы FEA [14].

Расчеты проведены для двухщелевого фундамента и однородного грунтового основания, параметры которых описаны выше, а глубина заложения фундамента последовательно принимала значения  $h = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$  м.

Так как метод [13], СНиП 2.02.01-83\* и СП 22.13330.2016 не предполагают использования в качестве переменного расчетного параметра коэффициент бокового давления грунта, все вычисления проведены при четырех его значениях  $\xi_o = 0.5, 0.6, 0.7, 0.8$ , которые входят в природный диапазон изменения значений этой величины [21, 22].

Численные значения величин интенсивности равномерно распределенной нагрузки, соответствующие моменту смыкания ОПД, которые строятся на основании условия пластичности Кулона [23, 24] (т. е. предельно допустимых нагрузок, полученных авторами при помощи компьютерной программы FEA [14]), и значения предельно допустимых нагрузок, рассчитанные авторами статьи по методике [13], приведены в таблице 1.

Для удобства анализа результатов вычислений по данным таблицы построены графические зависимости вида  $q_{n\theta} = f(h)$  (рис. 6). Результаты, полученные при расчете методом [13], на графике обозначены линией Б.

Совместный анализ результатов вычислений и графических зависимостей, приведенных на рис. 6, показал, что величина предельной нагрузки на основание щелевых фундаментов линейно зависит от глубины их заложения. После реализации сил трения и сцепления по внешним поверхностям стенок фундамента происходит реализация этих сил по некоторой части внутренних поверхностей. После этого несущая способность основания исчерпывается и фундамент «проваливается». Выпор связного грунта основания выше дневной поверхности маловероятен. Возможен внутренний

Таблица 1. Значения предельно допустимых нагрузок  
Table 1. Values of allowable ultimate loads

$h, \text{м}$	Величина интенсивности предельной нагрузки на основание $q_{n\theta}, \text{кПа}$					$\Delta, \%$	
	Метод [13]	СНиП 2.02.01-83* и СП 22.13330.2016	При помощи программы FEA [14]				
			$\xi_o = 0.5$	$\xi_o = 0.6$	$\xi_o = 0.7$	$\xi_o = 0.8$	
0.5	676.60	615.98	437.04	524.80	617.40	739.88	8.55(16.75)
1.0	805.86	711.94	524.88	686.16	844.20	1 062.53	24.16(33)
1.5	935.30	807.90	627.12	835.20	1 085.40	1 440.61	35.08(44)
2.0	1071.4	903.86	721.80	992.52	1 332.15	1 838.12	41.63(50.83)

<sup>2</sup> СНиП 2.02.01-83\*. Основания зданий и сооружений: утверждены постановлением Государственного комитета СССР по делам строительства от 5 декабря 1983 г. № 311; введены в действие 01.01.1985. URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200033?marker> (дата обращения: 05.06.2025).

<sup>3</sup> СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений = Soil bases of buildings and structures. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр и введен в действие с 17 июня 2017 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 05.06.2025).

выпор, о чём свидетельствует существенное развитие областей пластических деформаций в стороны от фундамента.

Совместный анализ графиков, приведенных на рис. 2–6, и данных, приведенных в таблице, позволяет сделать ряд выводов.

1. Зависимости вида  $q_{n\partial} = f(h)$  для всех рассмотренных способов определения величины предельной нагрузки и величины коэффициента бокового давления грунта носят линейный характер.
2. Величина коэффициента бокового давления грунта оказывает существенное влияние на величину предельной нагрузки. Увеличение численного значения  $\xi_o$  от 0.5 до 0.8 влечет за собой увеличение предельной нагрузки для фундамента глубиной заложения  $h = 0.5$  м на 41%; при  $h = 1$  м – на 51%; при  $h = 1.5$  м – на 56% и при  $h = 2$  м – на 61% при всех прочих равных условиях, рассматриваемых в настоящей работе.
3. Геометрические параметры фундамента также оказывают влияние на величину предельно допустимой нагрузки: увеличение отношения  $h/b$  влечет за собой увеличение предельной нагрузки по линейному закону, а увеличение отношения  $2b/h$ , напротив, снижает величину  $q_{n\partial}$  по логарифмическому закону.
4. Величина предельно допустимой нагрузки для двухщелевого фундамента приблизительно на 30% больше соответствующей нагрузки для трехщелевого фундамента (рис. 5а).
5. Трехщелевой фундамент проигрывает двухщелевому и по величине осадок, что видно из рис. 5б, где приведены кривые зависимости вида  $\frac{10^3 S}{h} = f(n)$ , построенные для момента исчерпания несущей способности по внешним поверхностям щелей фундаментов. Расчеты показывают, что для условий рассмотренных примеров осадки трехщелевого фундамента на 21–48% больше осадки двухщелевого фундамента.
6. Численные значения предельной нагрузки, вычисленные при помощи компьютерной программы FEA [14], могут быть как больше, так и меньше значений, полученных на основе СНиП 2.02.01-83\*, СП 22.13330.2016 и метода, описанного в работе [13]. Более того, из рис. 6 видно, что значения предельной нагрузки, вычисленные при помощи СП при  $h = 0.5$  м и  $h = 1.25$  м с точностью равны соответствующим значениям нагрузки, вычисленным при помощи предлагаемой компьютерной программы [14], при  $\xi_o = 0.7$  и  $\xi_o = 0.6$  соответственно. Величина предельно допустимой нагрузки, вычисленная на основе предложений Д. Н. Банникова [13] (на рис. 6 обозначено буквой Б) при  $h = 0.75$  м с точностью совпадает с соответствующим значением, рассчитанным при помощи компьютерной программы [14] для величины коэффициента бокового давления грунта  $\xi_o = 0.7$ .
7. При помощи обратных расчетов в среде компьютерной программы [14] установлено, что численные значения предельной нагрузки, размещенные во втором и третьем столбцах таблицы (результаты программы FEA [14] и указанных выше СНиП и СП), соответствуют следующим значениям коэффициента бокового давления: при  $d = 0.5$  м  $\xi_o = 0.755$  и  $\xi_o = 0.695$ ; при  $d = 1.0$  м  $\xi_o = 0.683$  и  $\xi_o = 0.635$ ; при  $d = 1.5$  м  $\xi_o = 0.645$  и  $\xi_o = 0.59$ ; при  $d = 2.0$  м  $\xi_o = 0.633$  и  $\xi_o = 0.57$ .

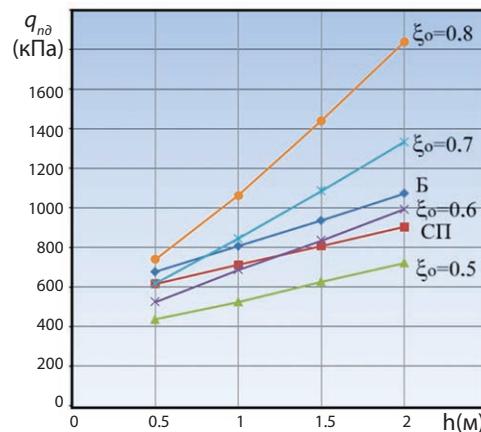


Рис. 6. Графические зависимости вида  $q_{n\partial} = f(h)$ , построенные для разных методов расчета (графики построены авторами)

Fig. 6. Graphical dependencies of  $q_{n\partial} = f(h)$  for various calculation methods (plots constructed by the authors)

Перейдя к средним значениям, получим, что результаты, получаемые по методике [13], соответствуют среднему значению коэффициента бокового давления  $\xi_o = 0.684$ , а по методике СНиП 2.02.01-83\* и СП22.13330.2016 –  $\xi_o = 0.623$ .

Отметим, что количественные оценки справедливы только для рассмотренных в работе примеров.

#### 4. Заключение / Conclusions

Результаты исследования указывают на то, что использование компьютерной программы FEA позволяет выявить влияние каждого из принятых переменных расчетных параметров на напряженное состояние активной зоны основания щелевого фундамента и учесть их совокупное влияние на величины критических нагрузок.

Расчетные значения предельно допустимой нагрузки на основание двухщелевого фундамента, получаемые по [13], СНиП 2.02.01-83\* и СП 22.13330.2016, соответствуют результатам, получаемым при помощи компьютерной программы FEA при определенных заданных значениях коэффициента бокового давления, то есть, по сути, являются частными решениями задачи об определении предельной нагрузки.

Установлено, что трехщелевые фундаменты при всех прочих равных условиях не превосходят двухщелевые ни по несущей способности, ни по осадкам. Кроме того, устройство трехщелевых фундаментов является более материалоемким и трудозатратным.

На основании вышеизложенного считаем возможным рекомендовать компьютерную программу FEA [14] для расчета оснований щелевых фундаментов по первой группе предельных состояний, сложенных связными грунтами, параметры которых оговорены в СНиП 2.02.01-83\* и СП 22.13330.2016.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contribution.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Сорочан Е. А., Ковалев В. А. Расчет двухщелевых фундаментов мелкого заложения. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2006;(1):11–14. URL: <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/857>
2. Сорочан Е. А., Ревазишвили Р. Г. Исследование работы щелевых фундаментов. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1986;(5):12–15.
3. Сорочан Е. А., Быцутенко В. К., Ярутин В. К. Работа малозаглубленных щелевых фундаментов при сейсмических воздействиях. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1990;(3):15–17.
4. Павлов В. В. *Щелевые фундаменты*. Красноярск: Стройиздат; 1992. 139 с.
5. Зубков В. М., Перлей Е. М., Раюк В. Ф., Феоктистова Н. В. *Подземные сооружения, возводимые способом «стена в грунте»*. Ленинград: Стройиздат, Ленингр. отделение; 1977. 200 с. URL: <https://dwg.ru/lib/2900>
6. Платонова С. В. Напряженно-деформированное состояние ленточного щелевого фундамента. *Известия вузов. Строительство*. 2011;(1):3–9.
7. Платонова С. В. Исследование влияния заглубления щелевого фундамента на его осадки и напряженное состояние грунтового основания. *Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии*. 2014;7(8):990–997.
8. Иванов А. А., Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Нестратов М. Ю., Донсков Р. Е. Экспериментальное исследование процесса образования областей предельного состояния в основании щелевого фунда-

мента на моделях из эквивалентного материала. *Интернет-вестник ВолгГАСУ. Сер.: Политехническая*. 2013;(2). URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013\\_2%2827%29.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013_2%2827%29.pdf)

9. Богомолов А. Н., Бартоломей Л. А., Богомолова О. А. Расчет основания щелевого фундамента по первой группе предельных состояний. *Construction and Geotechnics*. 2025;16(2):26–36. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2025.2.03>

10. Брандтль Х. Использование коробчатых фундаментов глубокого заложения для передачи больших нагрузок (мосты, электростанции, высотные здания). *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2005;(9):100–117. URL: <http://georeconstruction.net/journals/09/files/09008.pdf>

11. Петров В. П. К вопросу использования щелевых фундаментов на естественном основании для малонагруженных зданий и сооружений. В сб.: *Геотехнические проблемы строительства крупномасштабных и уникальных объектов. Труды международной геотехнической конференции, посвященной Году РФ в КР, 23–25 сентября 2004 года, Алматы, Казахстан*. Алматы: Казахстанская геотехническая ассоциация; 2004. С. 366–368.

12. Уткин В. С., Борисова О. Л. Расчет надежности щелевого фундамента по критерию несущей способности грунта основания на стадии эксплуатации. *Строительство уникальных зданий и сооружений*. 2017;(6):7–17. <https://doi.org/10.18720/CUBS.57.1>

13. Банников Д. Н. Устойчивость и несущая способность основания ленточных мелкозаглубленных щелевых фундаментов. *Наука и техника*. 2003;(5):16–19. URL: <https://sat.bntu.by/jour/article/view/1639/1538>

14. Богомолов А. Н., Богомолова О. А., Редин А. В., Ушаков А. Н. FEA. Российская Федерация. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015617889. 23 июля 2015 года. URL: [https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015\\_sv2015617889.pdf](https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015_sv2015617889.pdf)

15. Фадеев А. Б. *Метод конечных элементов в геомеханике*. Москва: Недра; 1987. 221 с. URL: <https://www.geokniga.org/books/16260>

16. Зенкевич О., Чанг И. *Метод конечных элементов в теории сооружений и механике сплошных сред*. Москва: Недра; 1974. 239 с. URL: <https://dwg.ru/dnl/1949>

17. Бартоломей Л. А., Богомолова О. А., Гейдт В. Д., Гейдт А. В. Назначение размеров расчетных схем при компьютерном моделировании напряженного состояния основания плитного фундамента на основе метода конечных элементов. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2023;(2):5–17. URL: <https://vgasu.ru/nauka/zhurnaly/vestnik-volggasu/arkhiv-vypuskov/2023-2/1>

18. Богомолов А. Н., Ушаков А. Н., Богомолова О. А., Соловьев А. В., Прокопенко А. В., Калиновский С. А. Определение глубины развития областей пластических деформаций в однородном основании заглубленного ленточного фундамента на основе анализа напряженного состояния грунтового массива при помощи методов теории функций комплексного переменного. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2013;(30):13–26. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20362995>

19. Богомолова О. А. Расчет несущей способности основания двухщелевого ленточного фундамента. *Construction and Geotechnics*. 2021;12(1):57–71. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.05>

20. Каган А. А. *Расчетные показатели физико-механических свойств грунтов*. Ленинград: Стройиздат; 1973. 144 с. URL: <https://dwg.ru/lib/3053>

21. Месчян С. Р. *Начальная и длительная прочность глинистых грунтов*. Москва: Недра; 1978. 207 с. URL: <https://dwg.ru/lib/4159>

22. Вялов С. С. *Реологические основы механики грунтов*. Москва: Высшая школа; 1978. 447 с. URL: <https://dwg.ru/dnl/5735>

23. Coulomb C. A. Essai sur une application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs, à la architecture. In: *Mémoires de mathématique et de physique*. Paris: De l'Imprimerie Royale; 1776. Vol. 7. P. 343–387.

24. Coulomb C. A. Application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. In: *Memories de savants étrangers de l'Academie des sciences de Paris*. Paris; 1773. 233 p.

#### References

1. Sorochan E. A., Kovalev V. A. Analysis of shallow double-slot foundations. *Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 2006;43:13–17. <https://doi.org/10.1007/s11204-006-0016-4>

2. Sorochan E. A., Revazishvili R. G. Performance of slit foundations. *Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 1986;23:185–190. <https://doi.org/10.1007/BF01711887>
3. Sorochan E. A., Bytsutenko O. V., Yarutin V. K. Performance of shallow slotted foundations subjected to seismic effects. *Soil Mechanics and Foundations Engineering*. 1990;27110–113. <https://doi.org/10.1007/BF02306667>
4. Pavlov V. V. *Slotted foundations*. Krasnoyarsk: Stroyizdat; 1992. 139 p. (In Russ.)
5. Zubkov V. M., Perley Ye. M., Rayuk V. F., Feoktistova N. V. *Underground structures constructed using the diaphragm wall method*. Leningrad: Stroyizdat, Leningr. otdeleniye; 1977. 200 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/lib/2900>
6. Platonova S. V. Stress-strain state of a strip slit foundation. *News of higher educational institutions. Construction*. 2011;(1):3–9. (In Russ.)
7. Platonova S. V. Investigation of the influence of penetration slit at its foundation rainfall and the stress state of subgrade. *Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies*. 2014;7(8):990–997.
8. Ivanov A. A., Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Nestratov M. Yu., Donskov R. E. Pilot study of formation process of limit state areas in the basis of the box-shaped foundation on the models made of the equivalent material. *Internet-Vestnik VolgGASU*. 2013;(2(27)). (In Russ.) URL: [http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013\\_2%2827%29.pdf](http://vestnik.vgasu.ru/attachments/IvanonBogomolovBogomolovaNestratovDonskov-2013_2%2827%29.pdf)
9. Bogomolov A. N., Bartolomey L. A., Bogomolova O. A. Calculation of the base of a slotted foundation according to the first group of limit states. *Construction and Geotechnics*. 2025;16(2):26–36. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2025.2.03>
10. Brandtl' X. Use of deep box foundations to transfer heavy loads (bridges, power plants, high-rise buildings). *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2005;(9):100–117. (In Russ.) URL: <http://georeconstruction.net/journals/09/files/09008.pdf>
11. Petrov V. P. On the issue of using slot foundations on a natural base for low-load buildings and structures. In: *Geotechnical problem on construction of large-scale and unique projects. Proceedings of International Geotechnical Conference dedicated to the Year of Russia in Kazakhstan 23–25 September 2004, Almaty, Kazakhstan*. Almaty: Kazakhstan Geotechnical Society; 2004. P. 366–368. (In Russ.)
12. Utkin V. S., Borisova O. L. Calculation of the reliability of the slit foundation by the criterion of the bearing capacity of the foundation soil at the stage of operation. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2017;(6):7–17. <https://doi.org/10.18720/CUBS.57.1>
13. Bannikov D. N. Stability and Bearing Ability' of Base of Strip Shallow Slot Fill Foundation. *Science & Technique*. 2003;(5):16–19. (In Russ.)
14. Bogomolov A. N., Bogomolova O. A., Redin A. V., Ushakov A. N. FEA. Russian Federation. Certificate of state registration of computer software No. 2015617889. 23 July 2015. (In Russ.) URL: [https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015\\_sv2015617889.pdf](https://vgasu.ru/upload/files/patent/2015_sv2015617889.pdf)
15. Fadeyev A. B. *Finite element method in geomechanics*. Moscow: Nedra; 1987. 221 p. (In Russ.) URL: <https://www.geokniga.org/books/16260>
16. Zenkevich O., Chang I. *Finite element method in the theory of structures and continuum mechanics*. Moscow: Nedra; 1974. 239 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/dnl/1949>
17. Bartolomey L. A., Bogomolova O. A., Geidt V. D., Geidt A. V. Assignment of the dimensions of the calculation schemes in computer simulation of the stress state of the plate foundation base based on the finite element method. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2023;(2):5–17. (In Russ.) URL: <https://vgasu.ru/nauka/zhurnaly/vestnik-volggasu/arkhiv-vypuskov/2023-2/1/>
18. Bogomolov A. N., Ushakov A. N., Bogomolova O. A., Solovev A. V., Prokopenko A. V., Kalinovskiy S. A. Depth determination of plastic deformation areas in homogeneous base of buried continuous footing on the base of the analysis of stress state of soil mass by complex variable method. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura*. 2013;(30):13–26. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=20362995>
19. Bogomolova O. A. Calculation of the bearing capacity of a two-slot strip foundation. *Construction and Geotechnics*. 2021;12(1):57–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2021.1.05>
20. Kagan A. A. *Calculated indicators of physical and mechanical properties of soils*. Leningrad: Stroyizdat; 1973. 144 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/lib/3053>
21. Meschyan S. R. *Initial and long-term strength of clay soils*. Moscow: Nedra; 1978. 207 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/lib/4159>

22. Vyalov S. S. *Rheological principles of soil mechanics*. Moscow: Vysshaya shkola; 1978. 447 p. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/dnl/5735>
23. Coulomb C. A. Essai sur une application des regles des maximis et minimis a quelques problemes de statique relatifs, a la architecture. In: *Mémoires de mathématique et de physique*. Paris: De l'Imprimerie Royale; 1776. Vol. 7. P. 343–387. (In French)
24. Coulomb C. A. Application des riles de maximus et minimis a quelques problemes de statique relatifs a L'architecture. In: *Memories de savants strangers de L'Academie des sciences de Paris*. Paris; 1773. (In French)



### Информация об авторах

**Богомолова Оксана Александровна**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры математических и естественнонаучных дисциплин, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, boazaritcyn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1163-6285>

**Богомолов Сергей Александрович**, канд. техн. наук, доцент кафедры испытаний сооружений, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация, bogomolovsa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5531-6163>

**Богомолов Никита Александрович**, студент, Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Российская Федерация, Волгоград, Российская Федерация, nik.bogomolov-34@yandex.ru

### Information about the authors

**Oksana A. Bogomolova**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Mathematical and Natural Sciences, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, boazaritcyn@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1163-6285>

**Sergey A. Bogomolov**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Testing of Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation, bogomolovsa@mgsu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5531-6163>

**Nikita A. Bogomolov**, Student, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, nik.bogomolov-34@yandex.ru

Получена 15 сентября 2025 г., одобрена 05 ноября 2025 г., принята к публикации 30 ноября 2025 г.

Received 15 September 2025, Approved 05 November 2025, Accepted for publication 30 November 2025



## Определяющие параметры для расчета барботажных дегазаторов

А. Г. Жулин, О. В. Сидоренко

Тюменский индустриальный университет  
Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

sidorenkoov@tyuiu.ru



**Аннотация.** К достаточно эффективным способам удаления растворенных газов, в частности углекислого, относится физическая десорбция, осуществляемая в процессе барботажа воды в свободном объеме. Барботажные дегазаторы отличаются технологичностью, простотой конструктивной части, надежностью эксплуатации независимо от сезона года. В ряде случаев выводы по исследованию барботажных явлений носят теоретический характер без учета большинства показателей физико-химического состава и конструктивных особенностей установок, что в итоге заканчивается «близостью» вида расчетных уравнений к результатам лабораторных данных или рекомендациями с учетом дополнительных условий. Учет физических явлений, происходящих в процессе барботажа, при необходимости отражения основного явления для практического использования, как правило, обеспечивается применением  $\pi$ -теоремы или метода планирования эксперимента. Обобщение теоретических и экспериментальных данных по определению расчетных параметров барботажных дегазаторов позволило сделать вывод о нецелесообразности оперирования коэффициентом диффузии. В качестве определяющих параметров для расчета при отсутствии данных по коэффициенту десорбции рекомендовано принимать водо-воздушное соотношение и продолжительность контакта в зависимости от ожидаемого эффекта удаления углекислого газа.

**Ключевые слова:** удаление углекислого газа, барботаж, десорбция, коэффициент десорбции, пузырчатые явления

**Для цитирования:** Жулин А. Г., Сидоренко О. В. Определяющие параметры для расчета барботажных дегазаторов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):36–49. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-36-49> EDN: LQTEJE

## Key parameters for calculating bubbling degassers

Alexander G. Zhulin, Olga V. Sidorenko

Industrial University of Tyumen  
Tyumen, 38 Volodarskogo St., 625000, Russian Federation

sidorenkoov@tyuiu.ru



**Abstract.** Physical desorption, achieved through water bubbling in a free volume, is a fairly effective method for removing dissolved gases, particularly carbon dioxide. Bubbling degassers are characterized by their

technological effectiveness, simple design, and reliable operation regardless of the season. In some cases, studies of bubbling plants are theoretical in nature and don't take into account most of their physicochemical composition parameters and design features of the units. As a result, the calculation equations become approximations for laboratory data or recommendations with additional conditions. Physical phenomena, as they need to be described during bubbling for practical application, are explained by the  $\pi$ -theorem or the experimental design method. A summary of theoretical and experimental data for determining the calculating parameters of bubbling degassers let us conclude that using the diffusion coefficient is inappropriate. In the absence of data on the desorption coefficient, we recommended to use the water-air ratio and the contact time, depending on the expected effect of carbon dioxide removal, as determining parameters for calculation.

**Keywords:** carbon dioxide removal, bubbling, desorption, desorption coefficient, bubbly phenomena

**For citation:** Zhulin A. G., Sidorenko O. V. Key parameters for calculating bubbling degassers. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(4):36–49. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-36-49>



## 1. Введение / Introduction

В подземных водах Тюменского региона, забираемых для хозяйственно-питьевых и производственных целей, содержатся растворенные газы, удаление которых является важной задачей, обеспечивающей процесс обезжелезивания, защиту водопроводной сети и теплоэнергетического оборудования от коррозионных явлений. Концентрация газов в воде зависит от физической природы газа, степени насыщения, давления и температуры. Удаление углекислого газа из подземной воды рекомендуется проводить физическими методами [1–3].

Создание поверхности контакта воздушной и водяной фаз при физических методах может быть осуществлено в пленочном варианте, капельном или посредством барботирования объема.

В градирнях создание поверхности контакта воздушной и водяной фаз в пленочном варианте осуществляется растеканием капель по поверхности оросителя – листового (полиэтиленового), речного (деревянного) или насыпного (керамических, пластмассовых насадок), то есть с некоторым приближением можно предполагать толщину контактной пленки. Однако методы расчета теплообмена сводятся к использованию объемного коэффициента теплоотдачи, отнесенного к 1 м<sup>3</sup> оросителя [3]. Коэффициенты теплоотдачи и массоотдачи определены для некоторых типов градирен по  $\pi$ -теореме с привлечением экспериментальных данных [4, 5].

Попытки переноса методов расчета тепловых процессов на десорбционные малоэффективны, так как явления, проходящие при этих процессах, значительно отличаются при одинаковых состояниях сред. Тепловые процессы – волновые, а десорбционные – молекулярно-кинетические, в них взаимодействуют силы межмолекулярные и поверхностного натяжения [6].

Первоначальные исследования по снижению агрессивных характеристик воды с избыточным газосодержанием (углекислоты, сероводорода, метана и др. газов) физическими методами проводились при изливе воды из отверстий – через дырчатые лотковые оросители (дождевание) [7]. Но, так как фиксирование площади поверхности контакта с воздухом затруднительно, теоретические исследования в этом направлении осуществляются недостаточно. Попытки использования упрощенного подхода к назначению поверхности контакта, проведенные Л. П. Румянцевой, не дали положительных результатов и завершились использованием частного варианта экспериментальных данных для конкретного объекта [8]. Метод капельного разбрзгивания используется при обезжелезивании воды, при этом процесс снижения газосодержания рассматривается как сопутствующий, зависящий от высоты расположения отверстий излива или напора у насадок. Метод не технологичен из-за высокой влажности в закрытых помещениях и замерзания воды в открытых бассейнах.

Принцип работы барботажного дегазатора основан на выравнивании концентрации газовых составляющих контактом с воздухом, имеющим минимальные парциальные давления удаляемого газа, с целью достижения количественного равновесия в воде и воздухе.

Концентрация растворенной углекислоты в воде, моль/л, выражается уравнением [9]

$$C_{CO_2} = K_{CO_2} \cdot p_{CO_2} = K_{CO_2} \cdot (p_{общ} - p_{H_2O}), \quad (1)$$

где  $K_{CO_2}$  – константа Генри, которая выражается через коэффициент абсорбции углекислоты в воде, моль/(л. Па),

$p_{CO_2}$  – парциальное давление углекислоты в газовой среде, Па,

$p_{общ}$  – общее давление газовой среды, Па,

$p_{H_2O}$  – давление водяных паров, Па.

Однако в подземной воде, кроме равновесной абсорбированной углекислоты, присутствующей согласно закону Генри – Дальтона, есть равновесная в химической связи, поддерживающая углекислотное равновесие в виде соединений угольной кислоты, и свободная (агрессивная) [10]



Исследования эффективности снижения содержания углекислого газа с использованием математического обоснования относительно активно проводятся для пузырчатых явлений [11].

При барботаже воды довольно затруднительно констатировать площадь контакта воздушных пузырьков (практически нереально). Размеры пузырьков сильно разнятся – от 0.1 мм до 2 см и более [12, 13, 14], – и любые усреднения или расчеты по вероятностям дают настолько большие отклонения от изменения любого исходного или эксплуатационного параметра процесса, что приходится обращаться к экспериментальным данным. Площадь контакта микропузырьков не участвует в десорбционном процессе, так как силы поверхностного натяжения превышают диффузионные. Размеры пузырей, в которых снижается влияние поверхностного натяжения, существенно зависят от температуры контактных сред и химического состава воды [15]. При незначительной турбулизации потоков воздушные пузыри изменяют диаметры и форму, что способствует неустойчивому развитию поверхности контакта (при этом, как правило, суммарная площадь контакта фаз в верхней части дегазатора снижается). «Сложность барботажного процесса такова, что вряд ли можно разработать его количественную теорию», – считает В. Г. Левич [13].

В расчетах сооружений по удалению угольной кислоты из подземной воды используется понятие общего коэффициента десорбции  $K_{*}$  [10, 16], которое введено из-за ряда трудностей использования основного расчетного уравнения вида (для двухфазных систем взаимный переход веществ характеризуется коэффициентом десорбции [17]):

$$G = K_{*} \cdot F \cdot \Delta C_{cp}, \quad (3)$$

где  $G$  – количество десорбируемой углекислоты, кг/ч,

$F$  – площадь поверхности контакта воды и воздуха, м<sup>2</sup>,

$\Delta C_{cp}$  – средняя движущая сила процесса десорбции, кг/м<sup>3</sup>.

Согласно теории процесса десорбции, при контакте воздушной и водной фаз на границе перехода молекулы испытывают сопротивление водной  $R_1$  и воздушной  $R_2$  сред, формирующих двойной пограничный слой [9] (двухслойное поглощение [18]). Эти сопротивления выражают через частные коэффициенты десорбции в пленке воды  $K_{*}$  и газа  $K_z$ :

$$K_{*} = 1/R_1 \text{ и } K_z = 1/R_2. \quad (4)$$

В большинстве приводимых рекомендаций сопротивление воздушной среды для слаборасторимых газов считается столь малым, что его можно исключить [16], т. е. процесс десорбции определяется переносом из жидкой фазы [17].

Общий коэффициент десорбции  $K_{\text{ж}}$ , зависящий от конструкции десорбера, обычно устанавливается экспериментальным путем и приводится в виде функциональной зависимости, которую выражают в безразмерных критериальных параметрах [6, 19–21]:

$$Sh = f(Re, Sc, \dots), \quad (5)$$

где  $Sh$  – критерий Шервуда, характеризует интенсивность диффузационного потока вещества (для маскообменных процессов):

$$Sh = \frac{K_{\text{ж}} \cdot d_n}{D}, \quad (6)$$

где  $d_n$  – средний диаметр пузырька воздуха, м,

$D$  – коэффициент диффузии удаляемого газа в жидкой среде,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,

$Re$  – критерий Рейнольдса:

$$Re = \frac{u \cdot d}{v}, \quad (7)$$

где  $u$  – скорость движения жидкости,  $\text{м}/\text{с}$ ,

$d$  – характерный линейный размер барботера, м,

$v$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $\text{кг}/(\text{м} \cdot \text{с})$  [Па·с],

$Sc$  – критерий Шмидта, характеризует связь скоростного и концентрационного полей:

$$Sc = \frac{v}{D}. \quad (8)$$

В упрощенных критериальных уравнениях для определения общего коэффициента десорбции (6) за определяющий размер принят диаметр воздушного пузырька  $d_n$ . Анализ экспериментальных и расчетных данных о размерах пузырей воздуха показал отсутствие единой расчетной зависимости, отражающей влияние свойств среды и размеров отверстия на диаметр пузыря [22]. По А. А. Кастальскому [1], при диаметре отверстий истечения воздуха 2 мм диаметр воздушных пузырей принят 0.0038 м, в работе [23]  $d_n = 0.005 \div 0.008$  м. Коэффициент десорбции в зависимости от исходных условий может значительно изменяться, поэтому, по мнению А. А. Кастальского, при получении для конкретных условий его нельзя распространять на другие отличные условия. В. Г. Айнштейн [6] отмечает, что недостатки использования коэффициентов массоотдачи проявляются особенно ярко, когда они зависят от движущей силы  $\Delta C$ .

Общий вид зависимости коэффициента десорбции, кроме параметров, обозначенных в уравнениях (5–8), может включать дополнительные параметры, и выражаться в виде [24]

$$K_{\text{ж}} = f(\Delta C, D, L, d_n, u, a, v, q_{y0}), \quad (9)$$

где  $L$  – характерный линейный размер барботера, м,

$d_n$  – средний диаметр пузырька воздуха, м,

$u$  – скорость движения воды в барботере,  $\text{м}/\text{с}$ ,

$v$  – коэффициент кинематической вязкости жидкости,  $\text{м}^2/\text{с}$ ,

$a$  – газосодержание барботажного слоя;

$q_{y0}$  – удельный расход воздуха,  $\text{м}^3/\text{м}^3$ .

Данные по коэффициенту десорбции углекислоты из подземных вод, принятые в водоснабжении, носят необобщенный характер и по разным источникам имеют различные значения. Неодинаковость

величин связывается с тем, что коэффициент молекулярной диффузии – переменная величина, зависящая от температуры, давления, первоначальной концентрации удаляемого газа, его структуры и величины, солесодержания. Согласно [21], «для приближенного определения коэффициентов диффузии в жидкостях пользуются различными формулами». Для субъективных расчетных параметров десорбции авторы в качестве исходных данных принимают конструктивные [1, 25], физико-химические [21] или кинетические [17, 26] параметры в зависимости от индивидуального подхода и текущих требований.

В реальных условиях значение коэффициента будет разным и ограничивается условиями проведения эксперимента [8, 20, 23, 27].

В основных процессах, используемых в химической технологии, как правило, рассматриваются абсорбционные или сорбционные явления. Десорбция в этих процессах выступает в качестве сопутствующего явления при регенерации обменных материалов или как процесс восстановления части исходного материала. В литературе по вопросу десорбции данные представлены слабо, в ряде случаев после представления значительного объема информации по абсорбции даются незначительные рекомендации по их применению к десорбции. В газовой среде молекулы перемещаются с более высокой скоростью, чем в жидкой, соответственно, сорбционный процесс проходит быстрее, чем десорбция газа из жидкости в результате более плотного расположения молекул и меньшей скорости перемещения в плотной среде.

В водоснабжении и теплоэнергетике в связи с трудностями в выявлении поверхности контакта *вода – воздух* и нечеткостью в назначении коэффициента десорбции используются эмпирические коэффициенты десорбции поверхностной, или объемной, массоотдачи  $K_*$ , коэффициент характеризует сумму компонентов системы *вода – воздух*, влияющих на массообмен. Согласно различным теориям, значения коэффициента десорбции определяются по уравнениям: в пленочной –  $K_* = D/\delta_{пл}$ , в пенетрационной (обновления поверхности фазового контакта – модель проницания) –  $K_* = 2[D/(\pi \cdot t)]^{0.5}$ , диффузионного пограничного слоя (гидродинамической аналогии) –  $K_* = (DS)^{0.5}$ , где:  $\delta_{пл}$  – толщина пленки,  $t$  – продолжительность процесса обновления,  $S$  – площадь поверхности контакта. При этом  $\delta_{пл}$  и  $S$  непосредственно определить невозможно без введения дополнительных допущений. «Приведенные модели можно использовать для расчета процессов только в частных случаях, так как вследствие чрезвычайной сложности турбулентных двухфазных потоков практически невозможно определение в них поверхности контакта фаз, распределения концентраций в фазах и других параметров, необходимых для расчета», – отмечается в [28].

Коэффициент массоотдачи связывают с коэффициентом молекулярной диффузии  $D$  соотношением [1, 6]

$$K_* \approx D^n, \quad (10)$$

где  $n$  – безразмерный показатель степени, изменяющийся в зависимости от принимаемой теории в интервале от 0 до 1. В расчетах процессов и аппаратов по массопереносу большинство исследователей рекомендуют принимать его равным 0.5 или определять через толщину пограничного слоя, что вносит дополнительную путаницу в рассматриваемых явлениях, так как в одних случаях толщину слоя связывают с величиной молекул межфазных поверхностей, а в других принимают, согласно рассуждениям, как возможную величину

$$\frac{D \cdot t}{\delta} = K_*, \quad (11)$$

где  $t$  – продолжительность десорбции, с,  
 $\delta$  – толщина пограничного слоя воды, м.

Но считать, что в массопереносе активно осуществляется диффузия, некорректно: диффузия – направленный молекулярный процесс, десорбция газа – физический перенос, обусловленный разностью плотностей.

Газовый компонент при барботировании удаляется из воды в основном в процессе обновления поверхностного слоя на пузыре. При турбулизации объема воды происходит активное переформирование межмолекулярного строения слоя, обволакивающего воздушный пузырь, газовые включения в меньшей степени защемлены молекулами воды с более плотной структурой. В результате снижения толщины пограничного слоя и нарушения поверхностного натяжения на воздушном пузыре происходит активный переход газа из жидкой среды в газообразную, имеющую малое парциальное давление.

Несмотря на широкое применение коэффициентов массоотдачи, критериальные уравнения не в полной мере учитывают влияющие факторы в связи с недостаточными знаниями о механизме процесса.

Расчет сооружений для практического использования более реально проводить по результатам исследований на пилотных установках.

Многообразие субъективных подходов к выбору расчетных параметров барботажных дегазаторов для решения практических задач предложено осуществлять экспериментальным путем с использованием независимого параметра водо-воздушного соотношения.

Опыт эксплуатации станций обезжелезивания тюменского региона показал, что снижение содержания углекислого газа в подземной воде в большей степени зависит от величины легко регулируемого и доступного параметра – водо-воздушного соотношения [19]. Первоначальное назначение параметра водо-воздушного соотношения (с целью конструктивного оформления дегазатора) осуществляется экспериментальным путем и в процессе эксплуатации регулируется в зависимости от требуемой эффективности снижения содержания углекислого газа.

Целью настоящего исследования являлось выявление определяющих параметров для расчета барботажных дегазаторов. В задачи входило:

- определить значения коэффициентов десорбции для различных высот слоя воды и площадей поверхности воды в стационарном режиме в зависимости от продолжительности контакта фаз;
- определить значение динамической составляющей десорбционного коэффициента (турбулентной десорбции) при барботировании воды воздухом;
- показать некорректность использования коэффициента диффузии в барботажном процессе снижения содержания углекислого газа;
- выявить факторы, влияющие на эффективность удаления углекислоты из подземной воды на барботажных дегазаторах;
- обосновать целесообразность применения предварительных экспериментов по дегазации воды с назначением соответствующего водо-воздушного соотношения для достижения требуемой эффективности дегазатора.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Исследования по десорбции углекислоты проводились в лабораторных и производственных условиях на пилотной установке и действующем (производственном) дегазаторе.

В лабораторных условиях определялось изменение содержания углекислоты через открытую неподвижную поверхность контакта воды с воздухом (стационарный режим) и при турбулизации объема воды путем барботажа воздухом. В первом случае процесс изучался при условиях, что вода имеет свободную поверхность раздела с воздухом, она абсолютно горизонтальна, жидкость имеет бесконечную глубину (по отношению к размерам молекул), температура обеих фаз постоянна. Высота слоя воды изменялась в пределах 0.03–0.15 м.

Режим барботажа исследовался в цилиндрах путем подачи воздуха с различной интенсивностью от компрессора через пористые аэраторы при высоте слоя воды 0.15 м.

В производственных условиях рассматривался противоточный режим подачи воды и воздуха на пилотной установке (колонке) диаметром 0.1 м. Продолжительность контакта воды с воздухом изменилась за счет увеличения слоя воды в колонке.

Измерения содержания углекислого газа в воде проводились согласно методике ЦВ 1.01.17-2004<sup>1</sup>.

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

При использовании коэффициента десорбции в расчетах принимаемая величина в обобщенном виде представляется суммой диффузии в стационарном и динамическом (турбулентном) состоянии системы по уравнению

$$\frac{dc}{dt} = D + D_{\text{турб}}. \quad (12)$$

В большинстве случаев при применении теории пограничного слоя предлагается не учитывать в расчетах сопротивление газо-воздушной среды ввиду малости. Но при определении коэффициента турбулентной диффузии приходится применять упрощенные модели, т. е. некоторые явления переноса газовых компонентов не учитываются, а принимаются на основе фактических данных (по обстоятельствам) с целью получения расчетных выражений. Уравнение скорости массообмена включает две неизвестные составляющие: поверхность соприкосновения  $dF$  и сопротивление к переходу из одной фазы (среды) в другую  $R$ .

$$dM = \frac{\Delta C \cdot dF}{R}. \quad (13)$$

Частное  $1/R$  заменяют на  $K = 1/R$ , и вводится обозначение коэффициента массопередачи.

Все компоненты правой части являются неизвестными. Разность концентрации даже при решении расчетным уравнением подставляется как ожидаемая, но в реальных условиях при использовании теории пограничного слоя она имеет отклонение. Величина коэффициента массопередачи является функцией многих переменных, и единого уравнения для его определения нет [6].

В расчетном виде в формулах при переходе к коэффициенту массопередачи используется значение коэффициента диффузии, что не совсем корректно. В режиме снижения концентрации углекислого газа в процессе десорбции коэффициент не может представлять диффузию, так как в связи со снижением концентрации газа в водной среде движущая сила процесса непрерывно снижается при продолжительности контакта и не имеет постоянного значения.

В ряде случаев для теоретического обоснования процесса десорбции рассматривается применение теории пограничного слоя, состоящего из двух слоев (жидкой и газообразной фазы), каждый слой создает сопротивление переходу газов из жидкой фазы. В неподвижном слое такое объяснение процесса десорбции допустимо, но в вопросе определения толщины пограничного слоя в настоящее время нет единого мнения.

Зависимость снижения содержания углекислого газа в воде в стационарном состоянии от высоты слоя воды представлена на рис. 1.

Скорость изменения содержания углекислого газа в воде уменьшается в результате снижения движущей силы процесса, связанной с концентрацией в объеме, и, соответственно, изменяется

<sup>1</sup> ЦВ 1.01.17-2004. ФР.1.31.2005.01580. Качество воды. Методика выполнения измерений содержания свободной углекислоты в пробах питьевых и природных вод. Титриметрический метод. Санкт-Петербург, 2005. URL: <http://gost.gtsever.ru/Data2/1/4293797/4293797540.pdf> (дата обращения: 12.08.2025).

коэффициент диффузии (теряя свойства коэффициента). При длительном контакте в верхнем слое воды концентрируется малое количество молекул, и система переходит в равновесное состояние. С увеличением высоты слоя увеличивается продолжительность перехода в равновесное состояние (рис. 1).

В неподвижном состоянии воды процесс перемещения углекислого газа имеет молекулярный характер, обусловленный межмолекулярными взаимодействиями, и относится к броуновскому движению.

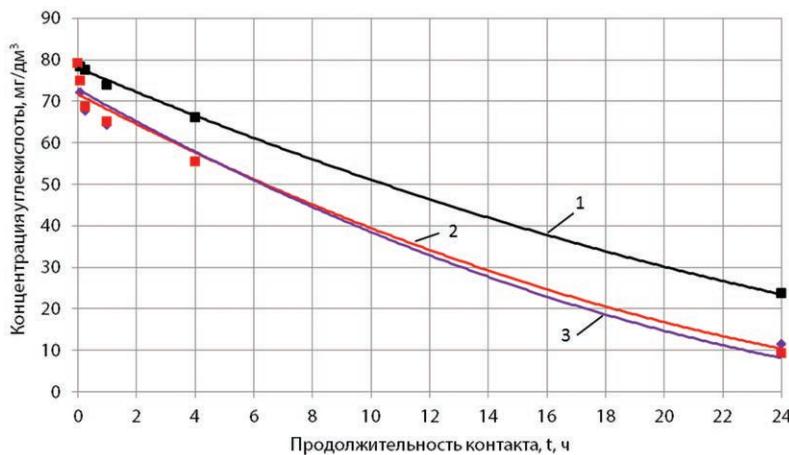


Рис. 1. Зависимость снижения концентрации углекислоты от продолжительности контакта в неподвижном объеме при различной толщине слоя воды:  
1 – 0.1 м; 2 – 0.05 м; 3 – 0.03 м (график составлен авторами)

Fig. 1. Dependence of the carbon dioxide concentration decrease on the contact duration in a fixed volume at different thickness of the water layer: 1 – 0.1 m; 2 – 0.05 m; 3 – 0.03 m  
(graph constructed by the authors)

Десорбция CO<sub>2</sub> из неподвижного слоя воды осуществляется через беспорядочное тепловое движение молекул, т. е. любая молекула в каждый момент равновероятно может иметь любое направление движения. При диффузии происходит направленный постоянный перенос молекул из областей высоких концентраций в более низкие. Перенос описывается статистическими уравнениями, они применимы лишь к массам, состоящим из большого числа диффундирующих молекул, при расстояниях и продолжительностях, которые намного больше средних путей пробега и времени между последовательными столкновениями.

Концентрация «С» растворенного газа в воде в процессе десорбции изменяется согласно уравнению

$$D_{\partial} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} = \frac{\partial C}{\partial t}. \quad (14)$$

Скорость переноса растворенного газа через единицу поверхности любой плоскости, параллельной поверхности жидкости, составляет

$$R_x = -D_{\partial} \left( \frac{\partial C}{\partial x} \right)_{x=0}, \quad (15)$$

где x – толщина слоя воды, из которого десорбируется газ,

D<sub>∂</sub> – коэффициент десорбции растворенного газа,

(∂C / ∂x)<sub>x=0</sub> – градиент концентрации у поверхности, являющейся функцией времени.

В статических условиях коэффициент десорбции – результирующая молекулярного взаимодействия в объеме и на поверхности слоя воды. Значение коэффициента зависит от площади поверх-

ности контакта и высоты слоя: чем меньше высота слоя воды, тем меньше коэффициент десорбции. При этом коэффициент отнесен к площади контакта и определяется по основному уравнению мас-сопереноса (3).

В динамических условиях десорбционный процесс характеризуется поверхностным явлением, зависящим от скорости противотока и размера воздушных пузырей, что приводит к постоянному обновлению поверхности контакта и увеличению количества удаляемого газа.

По результатам исследований получены значения коэффициентов десорбции из неподвижного объема (рис. 2) и при барботировании объема жидкости в лабораторных условиях (рис. 3).

Пример зависимости коэффициентов десорбции, характеризующих эффективность процесса удаления углекислоты на пилотной установке в сравнении с производственным дегазатором, от исходного содержания  $\text{CO}_2$  в воде, продолжительности дегазации и удельного расхода воздуха ( $q_{y\partial}$  – количество воздуха на 1  $\text{m}^3$  воды) приведен на рис. 4, 5.

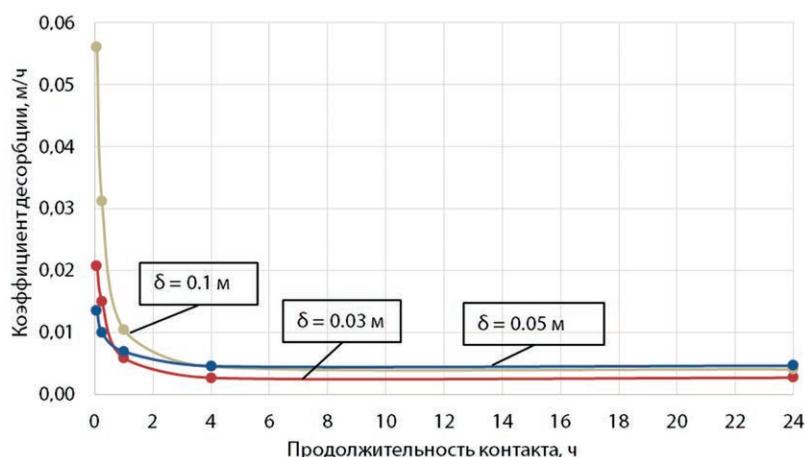


Рис. 2. Коэффициент десорбции углекислоты из неподвижного объема при различной толщине слоя воды  $\delta$  (график составлен авторами)

Fig. 2. Carbon dioxide desorption coefficient from a stationary volume at different thickness of the water layer  $\delta$  (graph constructed by the authors)

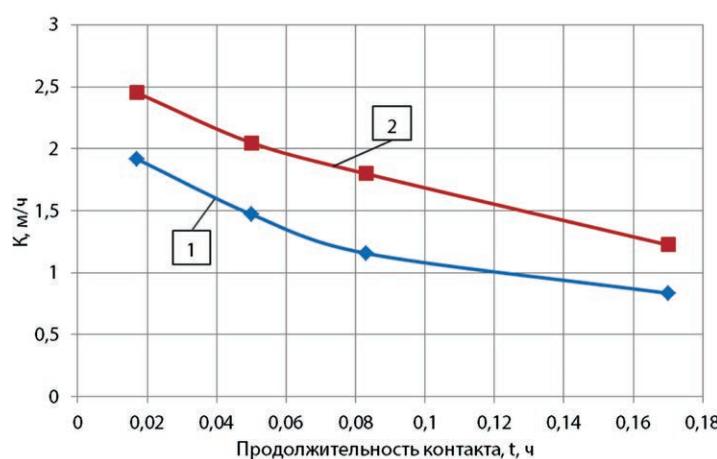


Рис. 3. Коэффициент десорбции углекислоты при разной интенсивности барботажа:  
1 – 0.7 л/(с·м<sup>2</sup>); 2 – 3.0 л/(с·м<sup>2</sup>) (график составлен авторами)

Fig. 3. Carbon dioxide desorption coefficient at different bubbling intensity: 1 – 0.7 l/(s·m<sup>2</sup>); 2 – 3.0 l/(s·m<sup>2</sup>) (graph constructed by the authors)

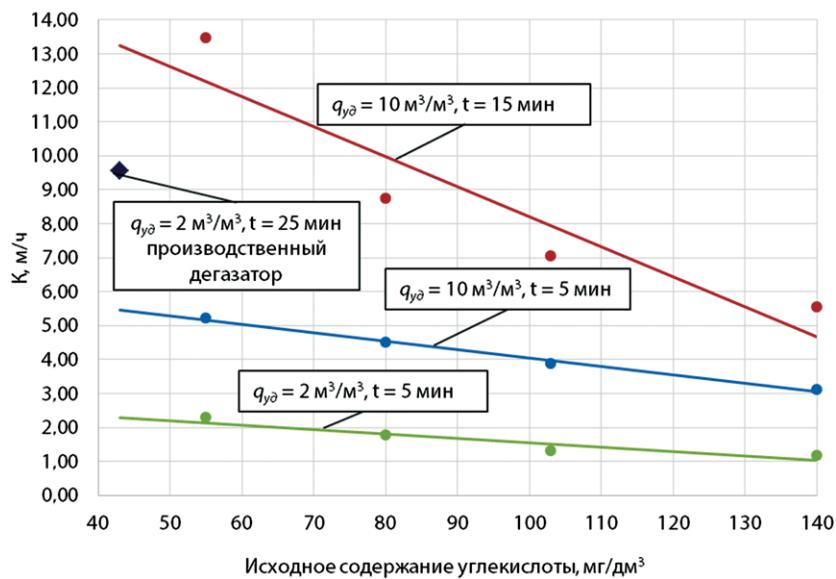


Рис. 4. Изменение коэффициента десорбции углекислоты в проточном режиме в зависимости от исходного содержания углекислоты в воде (график составлен авторами)

Fig. 4. Change in the coefficient of carbon dioxide desorption during flow mode depending on the initial carbon dioxide content in the water (graph constructed by the authors)

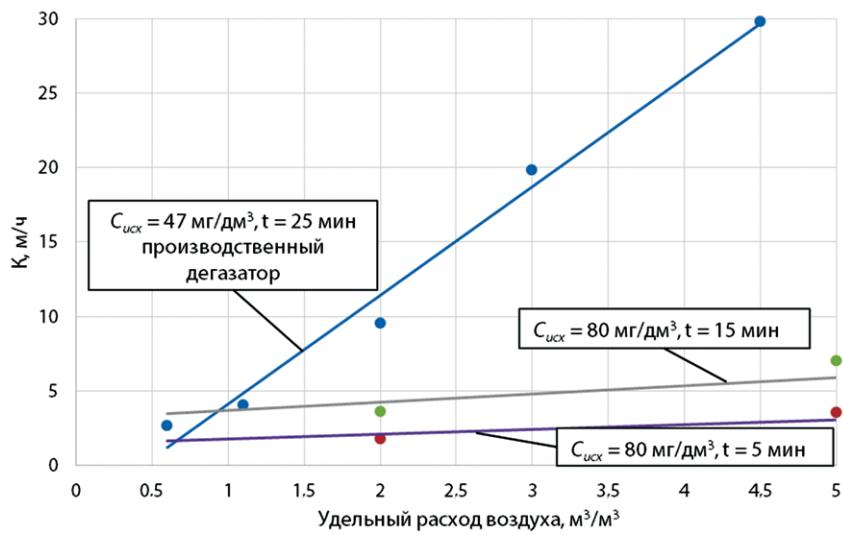


Рис. 5. Изменение коэффициента десорбции углекислоты в проточном режиме в зависимости от удельного расхода воздуха (график составлен авторами)

Fig. 5. Change in the coefficient of carbon dioxide desorption during flow mode, depending on the specific air flow rate (graph constructed by the authors)

При малых расходах воздуха ( $q_{y\vartheta}$  до 1 м<sup>3</sup>/м<sup>3</sup>) процесс десорбции происходит медленнее, что подтверждается близкими значениями коэффициентов десорбции при продолжительности процесса 5 и 25 минут при различных исходных содержаниях углекислоты (рис. 5).

Данные по снижению содержания углекислоты, полученные на пилотной установке (рис. 6) показывают, что увеличение скорости движения воды позволяет повысить эффект удаления CO<sub>2</sub> при малых расходах воздуха.

В динамическом режиме основным фактором, влияющим на степень снижения содержания  $\text{CO}_2$ , является переход  $\text{CO}_2$  через слой на границе вода – воздух. Диффузия в объеме воды проявляется себя в малой степени, так как основой перехода является сопротивление пограничного слоя и его непрерывное обновление.

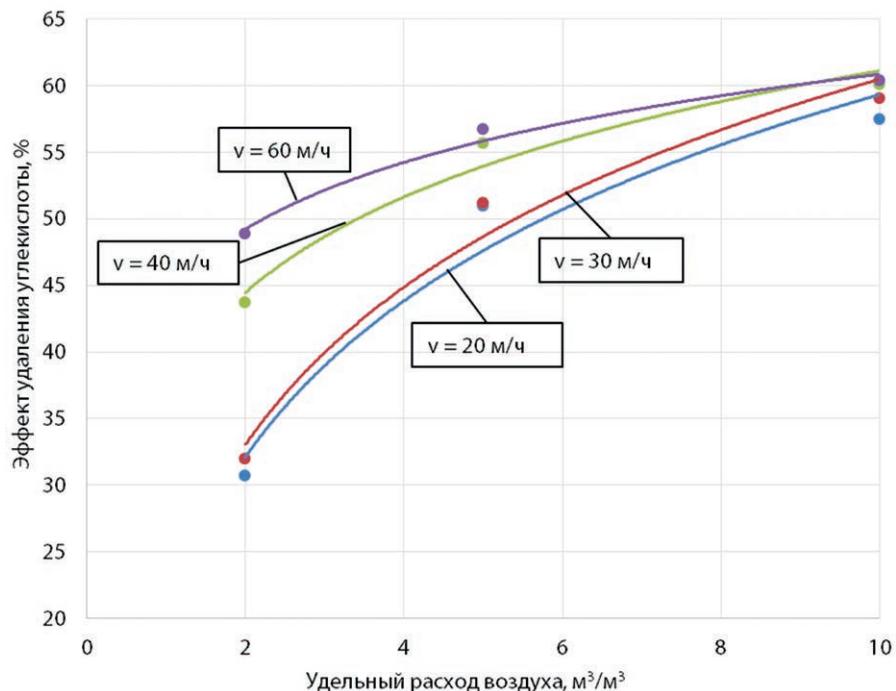


Рис. 6. Эффект удаления углекислоты в барботажном дегазаторе в зависимости от удельного расхода воздуха и скорости движения воды в противоточном режиме (график составлен авторами)

Fig. 6. The effect of carbon dioxide removal in a bubbling degasser, depending on the specific air flow rate and the speed of water movement in countercurrent mode (graph constructed by the authors)

Результаты, полученные на пилотной установке, используются для назначения необходимого расхода воздуха с целью достижения требуемой эффективности удаления углекислоты в производственных условиях. При расчете барботажных дегазаторов в расчетных зависимостях следует принимать значения коэффициентов десорбции, соответствующие принимаемой продолжительности барботажа.

#### 4. Заключение / Conclusions

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Коэффициент диффузии в десорбционном процессе углекислого газа нецелесообразно принимать в расчетной части барботажного дегазатора.
2. В статических условиях значение коэффициента десорбции зависит от высоты слоя воды, а в динамических – главным образом от продолжительности барботажа и водо-воздушного соотношения.
3. При отсутствии данных по коэффициенту десорбции (для конкретного барботера) в качестве определяющих параметров для расчета дегазатора рекомендуется принимать водо-воздушное соотношение и продолжительность контакта в зависимости от ожидаемого эффекта удаления углекислого газа.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contributions.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Кастальский А. А. *Проектирование устройств для удаления из воды растворенных газов в процессе водоподготовки*. Москва: Госстройиздат; 1957. 186 с.
2. Шарапов В. И., Сивухина М. А. *Декарбонизаторы водоподготовительных установок систем теплоснабжения*. Москва: Издательство АСВ; 2000. 200 с.
3. Сколубович Ю. Л., Войтов Е. Л., Сколубович А. Ю., Фролов А. Е. Исследования очистки подземной воды в аэраторе-дегазаторе. *Водоочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2011;(8):44–47. URL: <https://elibrary.ru/ofspom>
4. Гладков В. А., Арефьев Ю. И., Пономаренко В. С. *Вентиляторные градирни*. Москва: Стройиздат; 1976. 216 с. URL: <https://akvann.ru/sites/default/files/Вентиляторные%20градирни%20Гладков%20Арефьев%20Пономаренко%201976r.pdf>
5. Моргунова Е. П., Давидханова М. Г. Определение коэффициентов массоотдачи при десорбции диоксида углерода. В сб.: *Повышение энергоресурсоэффективности и экологической безопасности процессов и аппаратов химической и смежных отраслей промышленности (ИSTS «EESTE-2021»)*, Москва, 20–21 октября 2021 года. Т. 1. Москва: Российский государственный университет имени А.Н. Косыгина (Технологии. Дизайн. Искусство); 2021. С. 283–286. <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-1-283-286>
6. Айнштейн В. Г., Захаров М. К., Носов Г. А., Захаренко В. В., Зиновкина Т. В., Таран А. Л., Костянин А. Е. *Общий курс процессов и аппаратов химической технологии: в 2 т*. Москва: Химия; 2000.
7. Азерье С. Х. (ред.) *Водоснабжение на железнодорожном транспорте. Т. II*. Москва: Транспортное железнодорожное издательство; 1940. 508 с.
8. Румянцева Л. П. *Брызгальные установки для обезжелезивания воды*. Москва: Стройиздат; 1973. 104 с.
9. Стерман Л. С., Покровский В. Н. *Физические и химические методы обработки воды на ТЭС*. Москва: Энергоатомиздат, 1991; 328 с. URL: <https://djvu.online/file/VgYIHnRn9Da0p>
10. Фрог Б. Н., Первов А. Г. *Водоподготовка*. Москва: АСВ; 2014. 512 с. [https://www.litres.ru/get\\_pdf\\_trial/17187451.pdf](https://www.litres.ru/get_pdf_trial/17187451.pdf)
11. Иванов А. Е., Волкова О. А., Ключенкова М. И., Беренгартен М. Г. Оптимизация процесса обезжелезивания артезианских вод. *Вода: химия и экология*. 2011;(4):25–31. URL: <https://www.elibrary.ru/ohupun>
12. Лавров Н. А., Скорнякова Е. А. Моделирование процессов очистки жидкости от растворенного в ней газа при барботаже. *Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия Машиностроение*. 2010;(S1):155–160. URL: <https://www.elibrary.ru/ncsesuh>
13. Левич В. Г. *Физико-химическая гидродинамика*. Москва: Государственное издательство физико-математической литературы; 1959. 700 с. URL: <https://djvu.online/file/cy4jzFbJHOD4E>
14. Базаров Ю. Б., Мешков Д. Е., Мешков Е. Е., Сиволгин В. С. Исследование подъема пузыря воздуха в канале воды квадратного сечения. *Вестник Саровского ФизТеха*. 2005;(8):68–73. URL: <http://videoscan.ru/page/805>
15. Кухтин Б. А., Чернова О. Б. *Поверхностные явления и дисперсные системы*. Владимир: Изд-во ВлГУ; 2021. 153 с. URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9073/1/02215.pdf>
16. Копылов А. С., Лавыгин В. М., Очков В. Ф. *Водоподготовка в энергетике*. Москва: Издательство МЭИ; 2003. 309 с.
17. Островский Г. М. (ред.) *Новый справочник химика и технолога. Процессы и аппараты химических технологий. Ч. 2*. Санкт-Петербург: НПО «Профессионал»; 2006. 916 с.
18. Кафаров В. В. Основы массопередачи. Москва: Высшая школа; 1979. 439 с.
19. Жулин А. Г., Сидоренко О. В., Белова Л. В. Барботажные дегазаторы станций обезжелезивания (общие рекомендации к применению и расчету). *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2012;(3):39–48. URL: <https://www.elibrary.ru/pashqx>
20. Abdel-Rahman Z. A., Hasanb B. O., Abdullah A. K. A study of mass transfer into a liquid falling film in spiral tubes using CO<sub>2</sub> - water system. *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*. 2010;Special Issue (B):62–70. URL: [https://www.researchgate.net/publication/271135494\\_A\\_STUDY\\_OF\\_MASS\\_TRANSFER\\_INTO\\_A\\_LIQUID\\_FALLING\\_FILM\\_IN\\_SPIRAL\\_TUBES\\_USING\\_CO\\_2\\_-\\_WATER\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/271135494_A_STUDY_OF_MASS_TRANSFER_INTO_A_LIQUID_FALLING_FILM_IN_SPIRAL_TUBES_USING_CO_2_-_WATER_SYSTEM)
21. Рамм В. М. *Абсорбция газов*. Изд-е 2, переработанное и дополненное. Москва: Химия; 1976. 656 с. URL: <https://djvu.online/file/uWpBytFV8pHA9?ysclid=mhcyga4cas342940059>

22. Девягин В. А. Закономерности образования пузырей на отверстиях погруженных дырчатых листов барботажных аппаратов. *Теплоэнергетика*. 2024;(8):42–54. <https://doi.org/10.56304/S0040363624700097>
23. Болотова О. В. *Исследования по снижению содержания углекислоты из подземной воды Тюменского региона: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Нижний Новгород, 2005. 16 с. <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002973753?page=4&rotate=0&theme=white>
24. Жулин А. Г., Болотова О. В. К назначению параметров барботажа при удалении угле-кислоты из подземной воды при обезжелезивании. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2002;(12):66–70.
25. Лаптева Е. А., Фарахов М. И. Определение эффективности десорбции коррозионно-активных газов в колоннах с хаотичными и регулярными насадками. *Теплоэнергетика*. 2021;(2):93–98. <https://doi.org/10.1134/S004036362101015X>
26. Flagiello D., Parisi A., Lancia A., Di Natale F. A Review on gas-liquid mass transfer coefficients in packed-bed columns. *ChemEngineering*. 2021;5(3):43. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030043>
27. Echarte R., Campana H., Brignole E. A. Effective areas and liquid film mass transfer coefficients in packed columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1984;23:349–354.
28. Дытнерский Ю. И. *Процессы и аппараты химической технологии. Часть 2. Массообменные процессы и аппараты*. Изд. 2-е. Москва: Химия; 1995. 368 с. URL: <https://djvu.online/file/9f5bpkurfGX63?ysclid=mhd0g1jj7s967271817>

### References

1. Кастальский А. А. *Design of devices for removing dissolved gases from water during water treatment*. Moscow: Gosstroyizdat; 1957. 186 p. (In Russ.)
2. Sharapov V. I., Sivukhina M. A. *Decarbonizers for water treatment units in heating systems*. Moscow: ASV; 2000. 200 p. (In Russ.)
3. Skolubovich YU. L., Voytov Ye. L., Skolubovich A. Yu., Frolov A. Ye. Research of groundwater purification in an aerator-degasser. *Vodoочистка. Водоподготовка. Водоснабжение*. 2011;(8):44–47. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/ofspn>
4. Gladkov V. A., Aref'yev YU. I., Ponomarenko V. S. *Fan cooling towers*. Moscow: Stroyizdat; 1976. 216 c. (In Russ.) URL: <https://akvann.ru/sites/default/files/Вентиляторные%20градирни%20Гладков%20Арефьев%20Пономаренко%201976г.pdf>
5. Morgunova E. P., Davidkhanova M. G. Determination of mass rating coefficients at desorption of carbon dioxide. In: *Povysheniye energoresursoeffektivnosti i ekologicheskoy bezopasnosti protsessov i apparatov khimicheskoy i smezhnnykh otrassley promyshlennosti (ISTS «EESTE-2021»)*, Moscow, 20–21 October, 2021. Vol. 1. Moscow: A.N. Kosygin Russian State University (Technologies, Design, Art); 2021. P. 283–286. (In Russ.) <https://doi.org/10.37816/eeste-2021-1-283-286>
6. Aynshteyn V. G., Zakharov M. K., Nosov G. A., Zakharenko V. V., Zinovkina T. V., Taran A. L., Kostanyan A. Ye. *General course of processes and apparatuses of chemical engineering: in 2 volumes*. Moscow: Khimiya; 2000. (In Russ.)
7. Azer'yer S. Kh. (eds.) *Water supply in railway transport. Vol. II*. Moscow: Transportnoye zheleznodorozhnoye izdatel'stvo; 1940. 508 p. (In Russ.)
8. Rumyantseva L. P. *Spray systems for iron removal from water*. Moscow: Stroyizdat; 1973. 104 p. (In Russ.)
9. Sterman L. S., Pokrovskiy V. N. *Physical and chemical methods of water treatment at thermal power plants*. Moscow: Energoatomizdat, 1991; 328 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/VgYIHNrn9Da0p>
10. Frog B. N., Pervov A. G. *Water treatment*. Moscow: ASV; 2014. 512 p. (In Russ.) [https://www.litres.ru/get\\_pdf\\_trial/17187451.pdf](https://www.litres.ru/get_pdf_trial/17187451.pdf)
11. Ivanov A. E., Volkova O. A., Klyushenkova M. I., Berengarten M. G. *Optimization of iron removal process in artesian waters*. Voda: khimiya i ekologiya. 2011;(4):25–31. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/ohupun>
12. Lavrov N. A., Skornyakova Ye. A. Modeling of processes of liquid purification from dissolved gas during bubbling. *Herald of the Bauman Moscow State Technical University. Series mechanical engineering*. 2010;(S1):155–160. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/ncesuh>
13. Levich V. G. *Physicochemical Hydrodynamics*. Moscow: Gosudarstvennoye izdatel'stvo fiziko-matematicheskoy literatury; 1959. 700 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/cy4jzFbJHOD4E>
14. Bazarov Yu. B., Meshkov D. Ye., Meshkov Ye. Ye., Sivolgin V. S. Investigation of the rise of an air bubble in a square water channel. *Vestnik Sarovskogo FizTekha*. 2005;(8):68–73. (In Russ.) URL: <http://videoscan.ru/page/805>

15. Kukhtin B. A., Chernova O. B. *Surface phenomena and dispersed systems*. Vladimir: VISU; 2021. 153 p. (In Russ.) URL: <https://dspace.www1.vlsu.ru/bitstream/123456789/9073/1/02215.pdf>
16. Kopylov A. S., Lavygin V. M., Ochkov V. F. *Water treatment in the energy sector*. Moscow: MPEI; 2003. 309 p. (In Russ.)
17. Ostrovskiy G. M. (eds.) *New Handbook for Chemists and Technologists. Processes and Equipment for Chemical Engineering. Part 2*. Saint Petersburg: NPO «Professional», 2006. 916 p. (In Russ.)
18. Kafarov V. V. *Fundamentals of Mass Transfer*. Moscow: Vysshaya shkola; 1979. 439 p. (In Russ.)
19. Zhulin A. G., Sidorenko O. V., Belova L. V. Bubbler degassers for iron removal stations (general recommendations for use and calculation). *News of higher educational institutions. Construction*. 2012;(3):39–48. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/pashqx>
20. Abdel-Rahman Z. A., Hasanb B. O., Abdullah A. K. A study of mass transfer into a liquid falling film in spiral tubes using CO<sub>2</sub> - water system. *The Iraqi Journal For Mechanical And Material Engineering*. 2010;Special Issue (B):62–70. URL: [https://www.researchgate.net/publication/271135494\\_A\\_STUDY\\_OF\\_MASS\\_TRANSFER\\_INTO\\_A\\_LIQUID\\_FALLING\\_FILM\\_IN\\_SPIRAL\\_TUBES\\_USING\\_CO\\_2\\_-\\_WATER\\_SYSTEM](https://www.researchgate.net/publication/271135494_A_STUDY_OF_MASS_TRANSFER_INTO_A_LIQUID_FALLING_FILM_IN_SPIRAL_TUBES_USING_CO_2_-_WATER_SYSTEM)
21. Ramm V. M. *Gas Absorption*. 2<sup>nd</sup> edition, revised. Moscow: Khimiya; 1976. 656 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/uWpBytFV8pHA9?ysclid=mhcyga4cas342940059>
22. Devyanin V. A. Regularities of bubble formation on the holes of immersed hole sheets of bubble devices. *Teploenergetika = Thermal Engineering*. 2024;(8):42–54. <https://doi.org/10.56304/S0040363624700097>
23. Bolotova O. V. *Research on the reduction of carbon dioxide content in groundwater in the Tyumen region: abstract of a dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Nizhny Novgorod, 2005. 16 p. (In Russ.) <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002973753?page=4&rotate=0&theme=white>
24. Zhulin A. G., Bolotova O. V. On the assignment of bubbling parameters for removing carbon dioxide from groundwater during iron removal. *News of higher educational institutions. Construction*. 2002;(12):66–70. (In Russ.)
25. Lapteva E. A., Farakhov M. I. Determining the efficiency of desorption of corrosive-active gases in columns with chaotic and regular nozzles. *Thermal Engineering*. 2021;68(2):165–169. <https://doi.org/10.1134/S0040601521010158>
26. Flagiello D., Parisi A., Lancia A., Di Natale F. A Review on gas-liquid mass transfer coefficients in packed-bed columns. *ChemEngineering*. 2021;5(3):43. <https://doi.org/10.3390/chemengineering5030043>
27. Echarte R., Campana H., Brignole E. A. Effective areas and liquid film mass transfer coefficients in packed columns. *Industrial & Engineering Chemistry Process Design and Development*. 1984;23:349–354.
28. Dytnerkiy Yu. I. *Chemical engineering processes and apparatus. Part 2. Mass transfer processes and apparatus*. 2<sup>nd</sup> edition. Moscow: Khimiya; 1995. 368 p. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/9f5bpkurfGX63?ysclid=mhd0g1jj7s967271817>



### Информация об авторах

**Жулин Александр Гаврилович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, zhulinag@tyuiu.ru

**Сидоренко Ольга Владимировна**, канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, sidorenkoov@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3177-3025>

### Information about the authors

**Alexander G. Zhulin**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, zhulinag@tyuiu.ru

**Olga V. Sidorenko**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, sidorenkoov@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3177-3025>

Получена 04 сентября 2025 г., одобрена 13 ноября 2025 г., принята к публикации 03 декабря 2025 г.

Received 04 September 2025, Approved 13 November 2025, Accepted for publication 03 December 2025



# Исследование золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных блоков твердотопливного котла малой мощности

Д. И. Каштанов

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет  
Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., 4, 190005, Российская Федерация

dmitrii.kas@gmail.com



**Аннотация.** Приведены результаты исследования состояния золовых отложений на поверхности труб круглого поперечного сечения конвективных блоков двух водогрейных отопительных котлов KVу-1.0 (производитель – ООО «Балткотломаш», г. Санкт-Петербург) тепловой мощностью 1.0 МВт каждый при работе на длиннопламенном каменном угле с гранулометрическим составом 20–50 мм. Дано краткое описание физических свойств золовых отложений и факторов их формирования на поверхности труб во время работы котлов. По результатам натурных измерений отложений, сформировавшихся за отопительный сезон 2023–2024 г., выполнен анализ роста натрубных золовых отложений, где в виде графиков, построенных в проекции поперечного сечения конвективных труб диаметром 48 мм, представлена форма отложений золы.

**Ключевые слова:** золовые отложения, натурное обследование, конвективные пучки, сжигание угля, водогрейный отопительный котел

**Для цитирования:** Каштанов Д. И. Исследование золовых отложений на наружных поверхностях труб конвективных блоков твердотопливного котла малой мощности. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):50–62. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-50-62> EDN: AWFLEP

## Study of ash deposits on the outer surfaces of convective tubes in a low-power solid fuel boiler

Dmitriy I. Kashtanov

Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering  
Saint-Petersburg, 4, 2<sup>nd</sup> Krasnoarmeiskaya St., 190005, Russian Federation

dmitrii.kas@gmail.com



**Abstract.** This study presents the results of an investigation into the state of ash deposits on the surface of circular cross-section pipes in the convective sections of two hot-water heating boilers, model KVу-1.0 (manufactured by Baltkotlomash LLC, St. Petersburg), each with a thermal capacity of 1.0 MW. The boilers were operating on long-flame coal with a granulometric composition of 20–50 mm. The physical properties of the ash deposits and the factors influencing their formation on the pipe surface during boiler operation are briefly described. Based on the results of in-situ measurements of deposits formed during the 2023–2024 heating season, the growth of tube ash deposits was analyzed. The shape of the ash deposits is presented through graphs depicting their cross-sectional projection on convective tubes with a diameter of 48 mm.

**Keywords:** ash deposits, in-situ measurements, convective beams, coal burning, hot-water heating boiler

**For citation:** Kashtanov D. I. Study of ash deposits on the outer surfaces of convective tubes in a low-power solid fuel boiler. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(4):50–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-50-62>



## 1. Введение / Introduction

При рассмотрении вопросов, связанных с экономией топлива и повышением тепловой эффективности работы тепловых энергоустановок, наблюдается большой интерес к исследовательской деятельности в области физических процессов, связанных с образованием золовых и сажистых отложений на наружных стенках теплообменных поверхностей нагрева водотрубных котлоагрегатов, работающих на твердых видах топлива [1–3].

Образование шлаковых (вязких) и сыпучих (свободных) золовых отложений является одной из основных причин внеплановых выводов котлоагрегатов из строя [1, 4]. Проблема, возникающая вследствие образования золовых и сажистых отложений, связана со снижением коэффициента теплопередачи  $k$ , Вт/м<sup>2</sup>·°С, от греющего теплоносителя к нагреваемому, что приводит к падению КПД котлоагрегата [5]. Вследствие данного явления увеличивается расход топлива на единицу вырабатываемой тепловой энергии, что не соответствует поставленным задачам по эффективному использованию топливно-энергетических ресурсов в области коммунальной и промышленной теплоэнергетики. Кроме того, загрязнения поверхностей нагрева конвективных блоков котлов, особенно в случаях выбора неэффективных способов сжигания топлива или несвоевременной очистки оборудования от загрязнений, приводят к формированию массивных слоев золовых отложений, что является следствием понижения тепловой мощности котла и отпуска тепловой энергии потребителям [6–8].

В работах [9–12] представлена схема (рис. 1) поэтапного преобразования частицы угольного топлива в золовую частицу при горении. Выгорание частицы угольного топлива включает в себя следующие этапы: сушка топлива [10, 13] с выходом гигроскопической влаги, выход летучих, горение летучих, догорание коксового остатка, формирование негорючих золовых частиц.

В принятой классификации обнаруженные в котлах золовые отложения в зависимости от прочности связывания их как между отдельными частицами загрязнений, так и между частицами загрязнений и материалом теплообменных труб подразделяются на несколько типов [7, 15, 16]: сыпучие, связанные, шлаковые и связанные-шлаковые. Шлаковые и связанные-шлаковые золовые отложения образуются преимущественно в высокотемпературных зонах топочного пространства, в связи с чем либо полностью, либо частично находятся в расплавленном состоянии. Отложения такого типа обычно обладают плотным структурным строением и повышенной прочностью из-за высокой спекаемости частиц [8]. Сыпучие и связанные структуры золовых отложений обычно формируются в зонах с невысокими температурами (конвективных секциях) и обладают преимущественно слоистой структурой с менее прочными связями между частицами [8].

Замена вида сжигаемого в котлоагрегате топлива или способа сжигания (переход на другую марку угля, совместное сжигание нескольких видов топлива или сжигание новых видов топлива) мо-

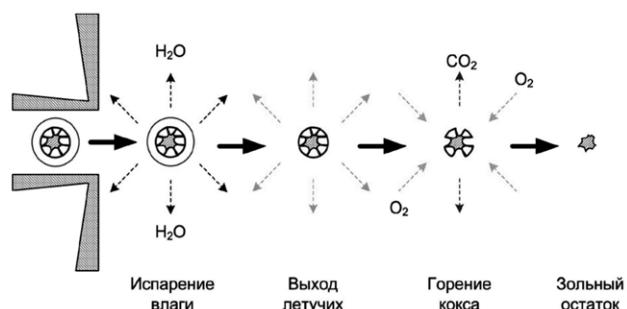


Рис. 1. Этапы выгорания угольной частицы в золовую частицу при горении [14]

Fig. 1. Stages of coal particle burnout into ash during burning [14]

жет оказать существенное влияние на режимы осаждения частиц летучей золы и характер образующихся натрубных отложений [5, 17].

В работах [2, 18] представлены результаты экспериментальных исследований, в ходе которых изучен процесс формирования отложений на наружной поверхности, расположенной в проходном канале одиночной трубы с круглой формой поперечного сечения наружной поверхности при различных режимных условиях, создаваемых во время проведения эксперимента. Было проведено три эксперимента, в ходе которых менялись скорость и температура запыленного потока продуктов сгорания, а также концентрация золовых частиц. Характеристики запыленного потока в опыте устанавливались следующие: температура потока, омывающего трубку, – 520 °C, скорость потока – 1.11 м/с, концентрация золовых частиц в потоке – 0.108 г/м<sup>3</sup>. В течение первых 10 мин нахождения трубы в запыленном потоке форма поверхности отложившегося слоя золовых частиц является неровной из-за низкой скорости потока, при которой еще не наблюдается явление сноса частиц с поверхности, тогда как при более высоких скоростях поток, отрывая налипшие на поверхность частицы, приводит к эффекту сглаживания неровностей наружной поверхности отложений. Поверхность сформировавшегося слоя отложений обычно имеет множество выемок и хребтов, обладающих наклоном в сторону движения газового потока. При проведении серии экспериментов выявлено, что увеличение скорости запыленного потока оказывает значительное влияние на интенсивность роста толщины отложений на поверхности трубы в интервале 10–20 мин. С увеличением скорости (с 1.58 до 2.05 м/с) и уменьшением концентрации золовых частиц (с 0.076 до 0.058 г/м<sup>3</sup>) в запыленном потоке продуктов сгорания на поверхности трубы во временном интервале 25–30 мин наблюдается снижение интенсивности роста золовых отложений. При этом высота слоя отложений в последние 5 мин проведения эксперимента остается величиной постоянной.

Цель исследования – выявление формирующейся структуры и формы поверхности отложений, имеющих важное значение для эффективной и надежной работы котлоагрегатов. Профили поверхности золовых отложений выявляют места с наибольшей склонностью к застанию проходных сечений межтрубных каналов конвективных пакетов водотрубных котлоагрегатов. Объект исследования: пучки труб конвективных блоков двух котлоагрегатов с механизированной топкой для сжигания угля.

Актуальность работы заключается в получении экспериментальных данных для уточнения величины термического сопротивления золовых отложений на конвективных поверхностях нагрева котлоагрегата малой мощности, используемой в тепловых расчетах.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Исследование геометрии сформировавшихся натрубных золовых отложений в период эксплуатации котлов в течение отопительного сезона на внешней поверхности труб конвективных пучков было выполнено в натурных условиях на действующем оборудовании, выведенном из работы в неотопительный период года. Данное исследование выполнялось после полного завершения охлаждения элементов котлоагрегатов.

Исследовались пучки труб конвективных блоков двух твердотопливных водотрубных водогрейных котлоагрегатов КВу-1.0 номинальной мощностью 1.0 МВт (производитель – ООО «Балткотломаш», г. Санкт-Петербург), оснащенных механизированной топкой. Котлоагрегаты предназначены для сжигания угля марки ДО («Длиннопламенный орех» [19]) с размером гранул от 20 до 50 мм. Проведение исследований двух одинаковых котлоагрегатов позволит сравнить полученные результаты измерений. Измерение толщины натрубных отложений производилось при помощи CMOS-камеры и последующей компьютерной обработки полученных данных путем сравнения размеров изображения загрязненных участков трубы с размером чистой конвективной трубы.

Схема расположения места доступа к конвективному пучку для проведения измерений и внешний вид котлоагрегата KVу-1.0 представлены на рис. 2а, б соответственно. Размещение труб в ряду конвективного пучка и точек мест замера толщины сформировавшегося слоя золовых отложений показаны на рис. 2с, д соответственно.

Обследование конвективных труб котлов было проведено в местах через лючки для обслуживания, размещенные в боковой и задней частях обшивки котла. Измерение толщины образовавшихся отложений на наружных поверхностях труб было проведено в 8 точках по окружности в полярных координатах (см. схему рис. 2с, д). Наружный диаметр конвективных труб равен 48 мм. Относительный поперечный шаг размещения труб в пучке равен  $\sigma_1 = S_1/d_h = 1.98$ ; относительный продольный шаг размещения труб в пучке составил  $\sigma_2 = S_2/d_h = 2.6$ .

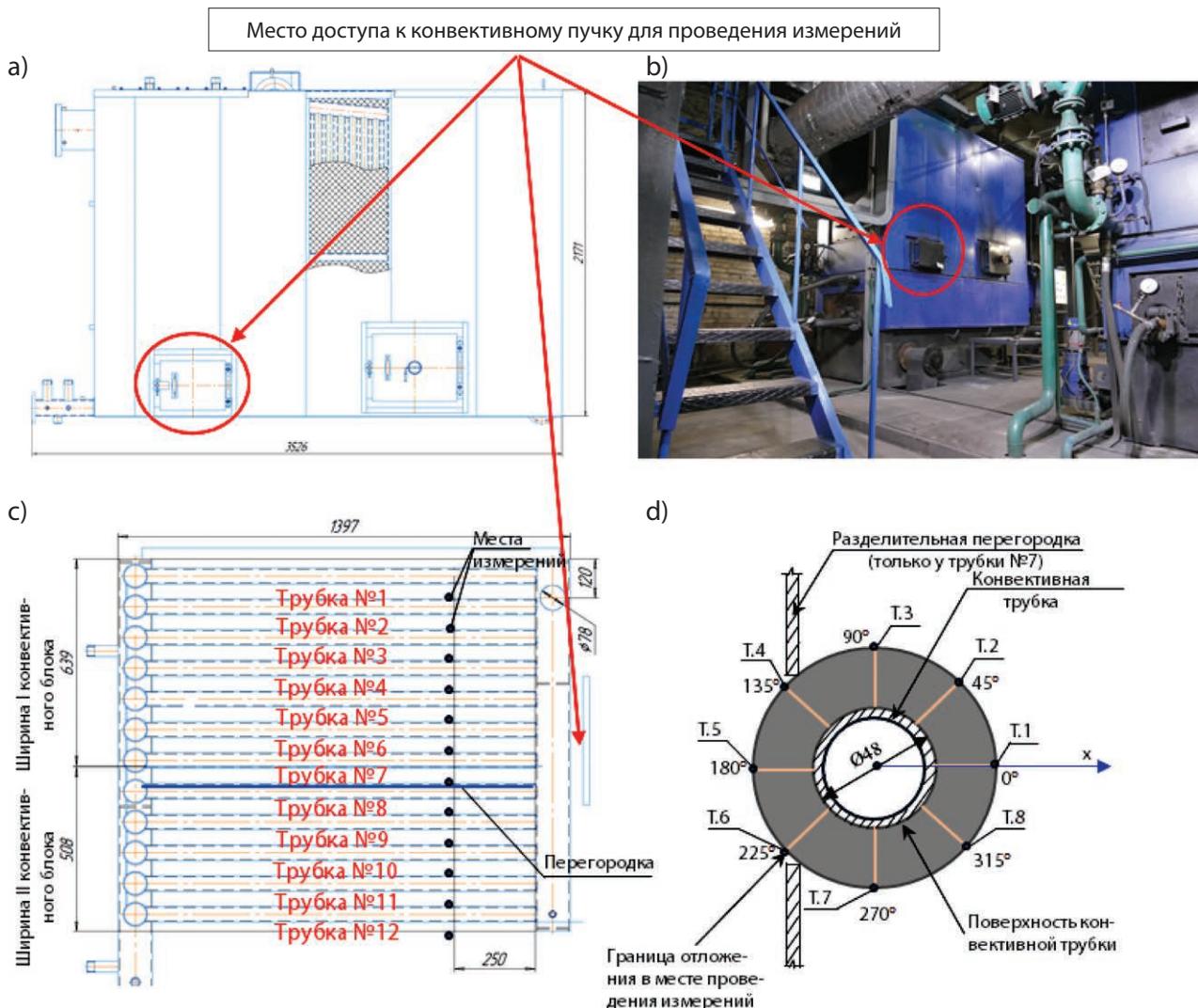


Рис. 2. Схема проведения измерений: а) боковой вид котла KVу-1.0; б) фотография бокового вида котла KVу-1.0, установленного в действующей отопительной котельной; в) схема расположения труб в конвективных блоках котлоагрегата KVу-1.0; г) точки мест замеров толщины золовых отложений (рисунок автора)

Fig. 2. Measurement setup: a) side view of the KVу-1.0 boiler; b) photo of the side view of the KVу-1.0 boiler installed in the operational heating plant; c) pipe layout in the convective sections of KVу-1.0 boiler unit; d) locations for measuring ash deposit thickness (author's figure)

Особенностью компоновки теплообменных блоков в конструкции котлоагрегатов КВу-1.0 является смонтированная перегородка у трубы 7, которая размещается согласно схеме (рис. 2d) и простирается на всю высоту конвективного пучка за исключением пространства под конвективным пучком, необходимого для организации перетока дымовых газов из одной конвективной секции с трубами 1–7 в другую конвективную секцию котла с трубами 8–12. В конвективных пакетах котлоагрегата КВу-1.0 предусмотрено две схемы движения дымовых газов: в первом конвективном пакете, установленном сразу за топкой, – с направлением движения дымовых газов сверху вниз, во втором конвективном пакете – с направлением движения дымовых газов снизу вверх. Такая особенность конструкции котла дает возможность проанализировать влияние направления движения потока дымовых газов на форму золовых отложений. Во избежание в процессе проведения замеров случайных обрушений рыхлых натрубных отложений золы были проведены измерения золовых отложений на трубах 2–11 нижнего ряда на расстоянии 25 см от мест врезки труб в стояк конвективного блока котла.

### **3. Результаты и обсуждение / Results and discussion**

В ходе исследования были сделаны фотографии внешнего вида поверхности натрубных отложений золы в конвективных блоках котлов 1 (рис. 3a, b).

Результаты исследования по точкам, отмеченным на рис. 2d, были сведены в журналы измерений, по данным которых построены профили форм наружных поверхностей (границ) золовых отложений, представленных в виде совмещенных круговых диаграмм в полярных координатах (рис. 4). Стрелками указано направление движения продуктов сгорания.

Проанализировав полученные данные в ходе обследования котла 1 и котла 2, можно сделать следующие обобщения:

- золовые отложения на трубах 10 и 11 нижнего ряда обоих котлов имеют наиболее плотную структуру слоя из всех обследованных труб нижнего ряда. Золовые отложения на трубах 7 в обоих котлах имеют наиболее рыхлую структуру слоя отложений из всех обследованных труб нижнего ряда;
- золовые отложения на трубах 8–11 в нижнем ряду котла 1 при направлении движения омывающего их потока дымовых газов снизу вверх имеют более равномерную толщину слоя отложений по периметру труб, чем у труб 2–7 при направлении движения омывающего их потока дымовых газов сверху вниз;
- наибольшая толщина золовых отложений (15 мм) в нижнем ряду конвективных трубок наблюдается на трубе 3 котла 2 в точке Т.7;
- наименьшая толщина золовых отложений (1 мм) в нижнем ряду конвективных трубок наблюдается на трубе 3 котла 2 в точке Т.6;
- наибольшие значения толщин золовых отложений наблюдаются в тыльных местах труб (по отношению к направлению движения дымовых газов).

После обработки результатов проведенных исследований толщины золовых отложений нижнего ряда труб конвективных пучков котлов 1 и 2 построены полиномиальные зависимости (рис. 5–8). К II конвективному блоку отнесены значения толщины отложений на трубе 7 в точках Т.4–Т.6, омываемые потоком снизу вверх, к I конвективному блоку отнесены значения толщины отложений на трубе 7 в остальных точках измерения, омываемые потоком сверху вниз.

Из рис. 5 видно, что зависимость осредненной толщины отложений (среднее арифметическое значение толщины золы в точках измерения) от места расположения труб в ряду является нелинейной функцией, характеризующей неравновесное осаждение золы по ширине конвективного блока. Наблюдается как увеличение, так и уменьшение осредненных значений золовых отложений

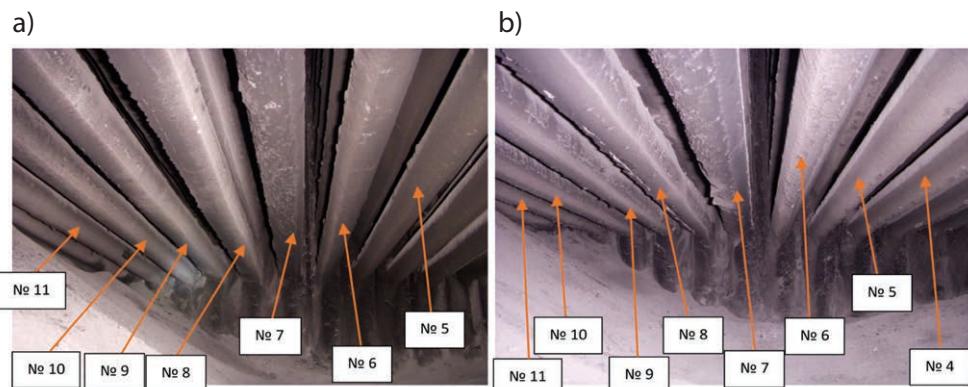


Рис. 3. Вид нижнего ряда труб конвективных блоков котлоагрегата KVU-1.0 с обозначением номера трубы согласно схеме рис. 2с: а) котла 1; б) котла 2 (рисунок автора)

Fig. 3. View of the lower row of pipes in the convective sections of the KVU-1.0 boiler unit, showing pipe numbers according to the scheme in Fig. 2c: a) boiler 1; b) boiler 2 (author's figure)

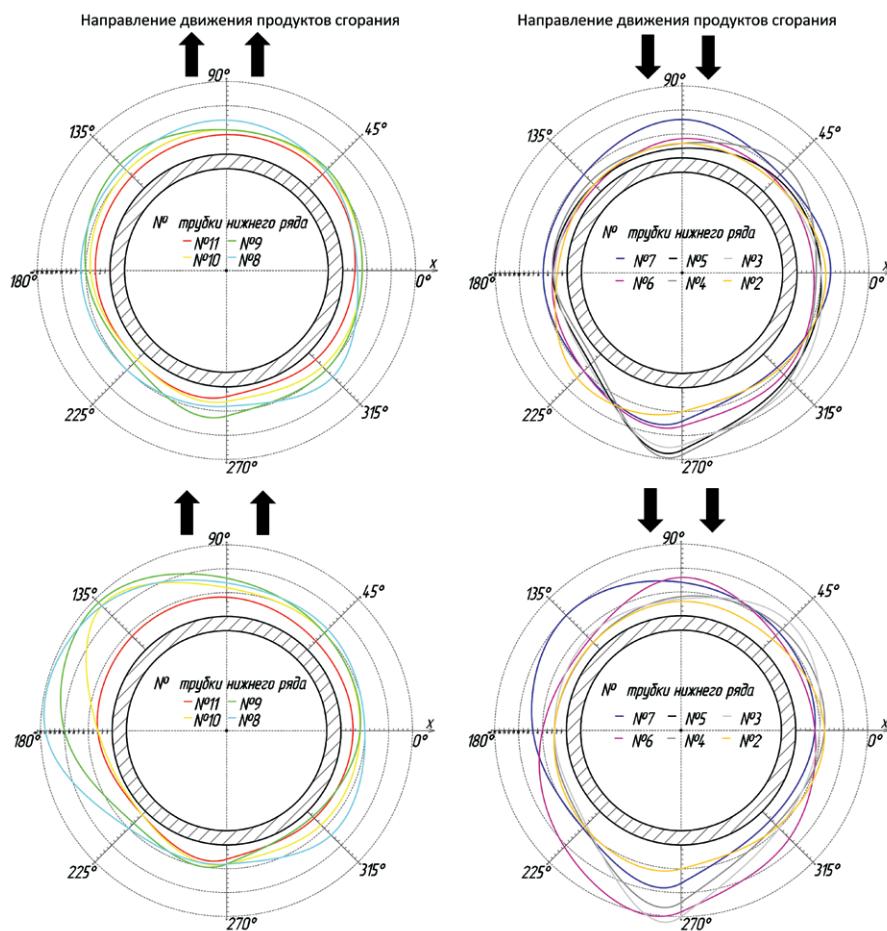


Рис. 4. Совмещенные диаграммы профилей форм (границ) наружных поверхностей золовых отложений на конвективных трубах 2–11 нижнего ряда: а) котел 1, II конвективный блок; б) котел 1, I конвективный блок; в) котел 2, II конвективный блок; г) котел 2, I конвективный блок (рисунок автора)

Fig. 4. Overlaid diagrams showing the profiles of ash deposits outer surfaces shapes (boundaries) on convective pipes 2–11 in the lower row: a) boiler 1, convective section II; b) boiler 1, convective section I; c) boiler 2, convective section II; d) boiler 2, convective section I (author's figure)

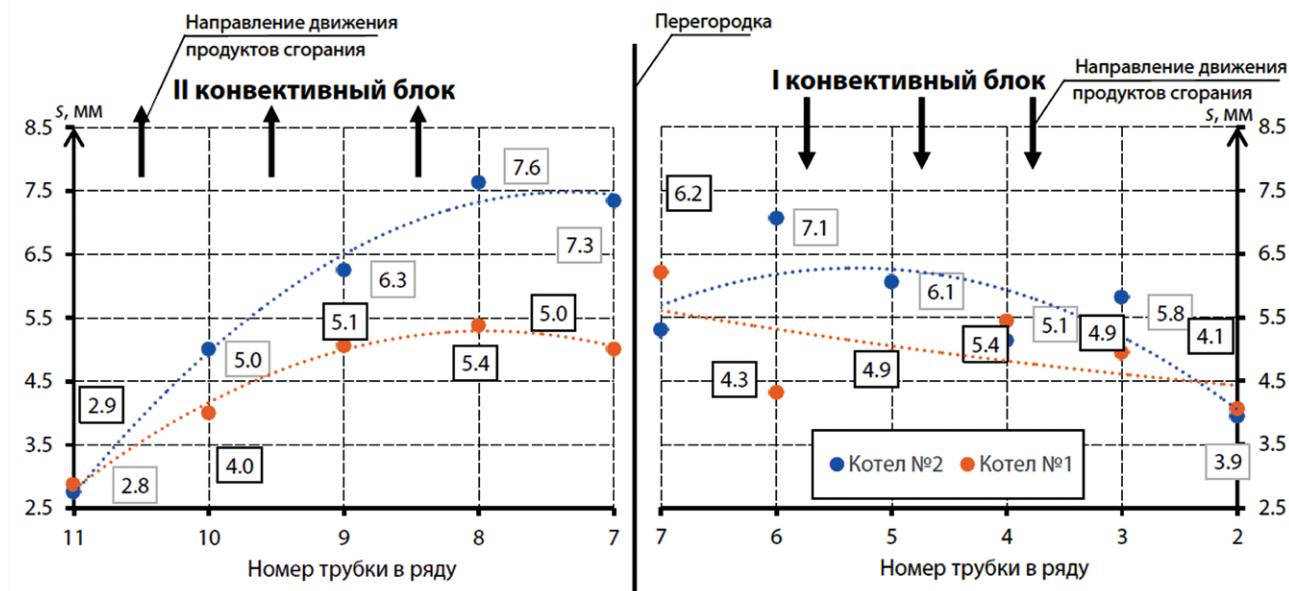


Рис. 5. Зависимости осредненных значений толщины отложений золы на конвективных трубах по длине нижнего ряда обследованных труб для котлов 1 и 2 (рисунок автора)

Fig. 5. Dependencies of the average ash deposit thickness values against the longitudinal position along the lower row of examined convective pipes for boilers 1 and 2 (author's figure)

по ширине конвективных блоков котлов 1 и 2 при приближении к разделительной межсекционной перегородке конвективных блоков и стенкам.

В случае исследования котла 2 максимальное значение осредненной толщины отложений среди всех обследованных труб составило 7.6 мм на трубе 8, которая располагается первой от разделительной перегородки в пучке и находится в зоне с движением продуктов сгорания снизу вверх. Также видно, что для пучка труб, через которые проходит поток продуктов сгорания снизу вверх, зависимость осредненной толщины отложений от ширины конвективного блока близка к линейной, с минимумом для трубы 11 в нижнем ряду, равным 2.8 мм. Разница между максимальным (труба 8) и минимальным (труба 11) значением осредненной толщины золовых отложений в части конвективного блока труб котла 2 с движением потока продуктов сгорания снизу вверх равна 4.7 мм.

В случае исследования котла 1 максимальное значение средней толщины отложений среди всех обследованных труб составило 5.8 мм (на 23.7 % меньше максимального значения, выявленного у труб котла 2) на трубке 7, в зоне, располагающейся перед разделительной перегородкой в области направления движения дымовых газов сверху вниз. Также обнаружен скачок осредненной толщины отложений (5.4 мм) на трубе 4 нижнего ряда котла 1.

Из рис. 5 видно, что после достижения максимальных значений осредненной толщины золовых отложений для обоих котлов вблизи разделительной перегородки осредненная толщина отложений по ширине конвективного блока изменяется. Тенденции уменьшения и увеличения осредненной толщины отложений в зоне движения продуктов сгорания сверху вниз у котла 1 и у котла 2 не совпадают. У котла 1 в нижнем ряду труб наблюдается только один скачок увеличения осредненной толщины отложений, а у котла 2 в нижнем ряду труб наблюдается два скачка увеличения осредненной толщины отложений.

Из рис. 6 видно, что толщина золовых отложений на боковых сторонах конвективных трубок в зависимости от места расположения трубы в нижнем ряду имеет ярко выраженную неравномерность. Выявлено, что на боковых сторонах (в точках проведения измерения T.5 и T.1) конвективных труб 11 для двух обследованных котлов толщина золовых отложений находится в диапазоне от 2.5

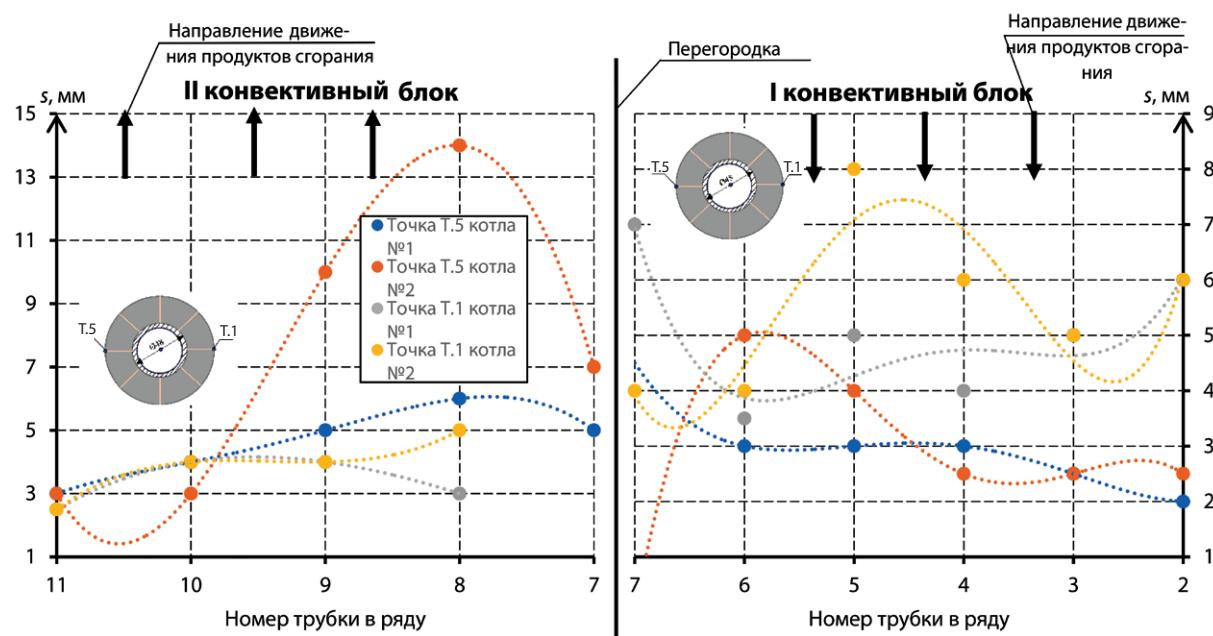


Рис. 6. Зависимости толщины отложений золы по ширине конвективного блока для точек T.1 и T.5 (рисунок автора)

Fig. 6. Dependences of ash deposit thickness across the width of the convective section for measurement points T.1 and T.5 (author's figure)

до 3 мм. Значения толщины золовых отложений в точке измерения T.1 котлов 1 и 2 на трубках 9–11, а также на трубках 2 и 3 полностью совпадают.

Изменение толщины золовых отложений в точке измерения T.5 котлов 1 и 2 для всех трубок нижнего ряда имеет следующую тенденцию: увеличение толщины слоя до трубки 8 (первая трубка после разделительной перегородки), а затем уменьшение толщины золовых отложений при приближении к стенкам конвективного блока. Для точки измерений T.1 зависимости имеют тенденции как к увеличению значения толщины золовых загрязнений, так и к уменьшению с приближением к стенкам конвективного блока. Максимальное значение толщины золовых отложений наружной поверхности трубок, равное 14 мм, зафиксировано для T.5 котла 2 на трубке 8, что больше значения, зафиксированного в аналогичной точке измерения на трубке 8 котла 1 на 8 мм. Значения толщин отложений в точке измерения T.5 у котла 2 на трубках 6–9, а у котла 1 на трубках 7–11 больше значений толщин отложений в точке T.1 у этих трубок. Начиная с трубок 5 обоих котлов и далее с приближением к стенке конвективного блока значения толщины золовых отложений на боковых частях труб в точках T.1 больше, чем в точках T.5 не менее чем на 1 мм.

Из рис. 7 видно, что значения толщин отложений для крайних исследованных трубок в нижнем ряду (трубки 2 и 11) находятся в небольшом диапазоне толщин – от 2.5 до 4 мм и от 2 до 3 мм соответственно, а толщина золовых отложений на поверхности других трубок в ряду имеет разброс от максимального значения в 14 мм (трубка 9 котла 2, T.4) до минимального значения толщины на тыльной стороне трубки, равного 1.5 мм (трубка 6 котла 1, T.4). Необходимо отметить, что толщина золовых отложений на трубке 11 в точке T.4 (левая часть тыльной стороны поверхности трубки) котла 2 имеет одинаковое значение с T.2 (правая часть тыльной стороны поверхности трубки) на трубке 11 другого котла, но при рассмотрении изменения толщины с приближением к стенке конвективного блока заметно, что толщина отложений при сравнении слоев на трубках 10 и 11 значительно увеличилась в точке T.4 – на 69.2 %, тогда как в точке T.2 – на 20 %. Разница значений на тыльной стороне трубки 10 котла 2 в точках измерения T.3 и T.4 равна 7 мм (53.8 %). Значительные отклонения в вели-

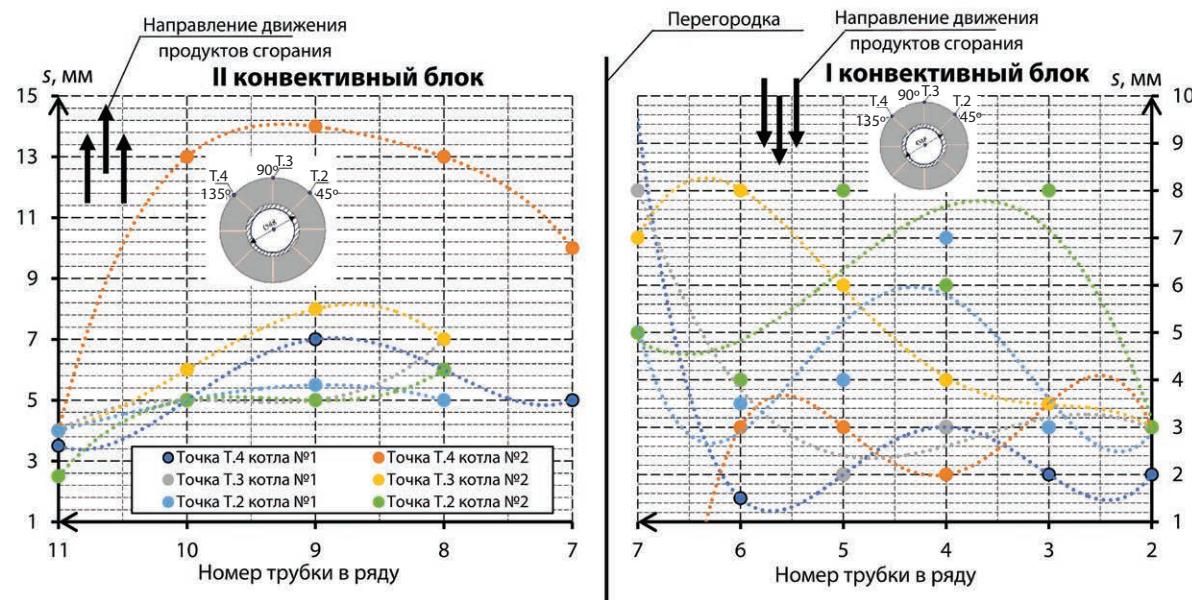


Рис. 7. Зависимости значений толщины отложений золы по ширине конвективного блока для точек T.2, T.3, T.4 (рисунок автора)

Fig. 7. Dependences of ash deposit thickness across the width of the convective section for measurement points T.2, T.3, and T.4 (author's figure)

чинах толщины золовых отложений в точке измерения T.4, которые прослеживаются и далее (вплоть до трубы 7) свойственны только котлу 2, в остальных рассмотренных случаях подобного разброса значений толщин слоя золы не замечено.

Сравнивая толщину слоев загрязнений после трубы 6 и далее по мере приближения к стенкам конвективного блока, заметно, что зависимости толщины отложений в точках T.2 в котлах 1 и 2 имеют резкие изменения толщины отложений (уменьшения и увеличения величин). Например, при сравнении толщин загрязнений на трубах 5 и 6 в T.2 изменение значений толщины в сторону ее увеличения составило 4 мм, а для этих же трубок в T.4 изменение толщины составило всего 0.5 мм.

Значения толщины отложений в точке измерений T.4 на трубах котла 1 совпадают со значениями для трубок 9 и 10 котла 2 в точках измерения T.2, а также со значениями для трубок 10 и 11 котла 1 в точках T.2.

Из рис. 8 видно, что разброс результатов измерений толщины отложений в точке T.8 у труб 5–11 котла 2 имеет ярко выраженный скачкообразный вид. Результаты измерений с менее выраженным скачкообразным видом имеют точки только для некоторых пар сравниваемых трубок. В отличие от зависимостей (рис. 6, 7), построенных для боковых и тыльной частей поверхности трубок, в случае омывания потоком фронтальной стороны трубок у зависимостей толщины золовых отложений наблюдается тенденция схожего (учитывая локальные перепады толщины золы от трубы к трубке) увеличения толщины золовых загрязнений с приближением к стенке конвективного блока. Это может быть объяснено тем, что фронтальная сторона трубок в случае с трубками 2–7 является подветренной по отношению к направлению движения потока продуктов сгорания в отличие от трубок 8–11, для которых фронтальная сторона является наветренной по отношению к направлению движения потока продуктов сгорания. За подветренной стороной труб обычно находится зона малой турбулентности с низкими скоростями потока и большей подверженностью процессам осаждения частиц летучей золы.

Зависимость толщины отложений золы на трубах котла 2 в точке измерений T.7 имеет параболическую форму снижения толщины отложений между трубками 3–6, где максимальные значения

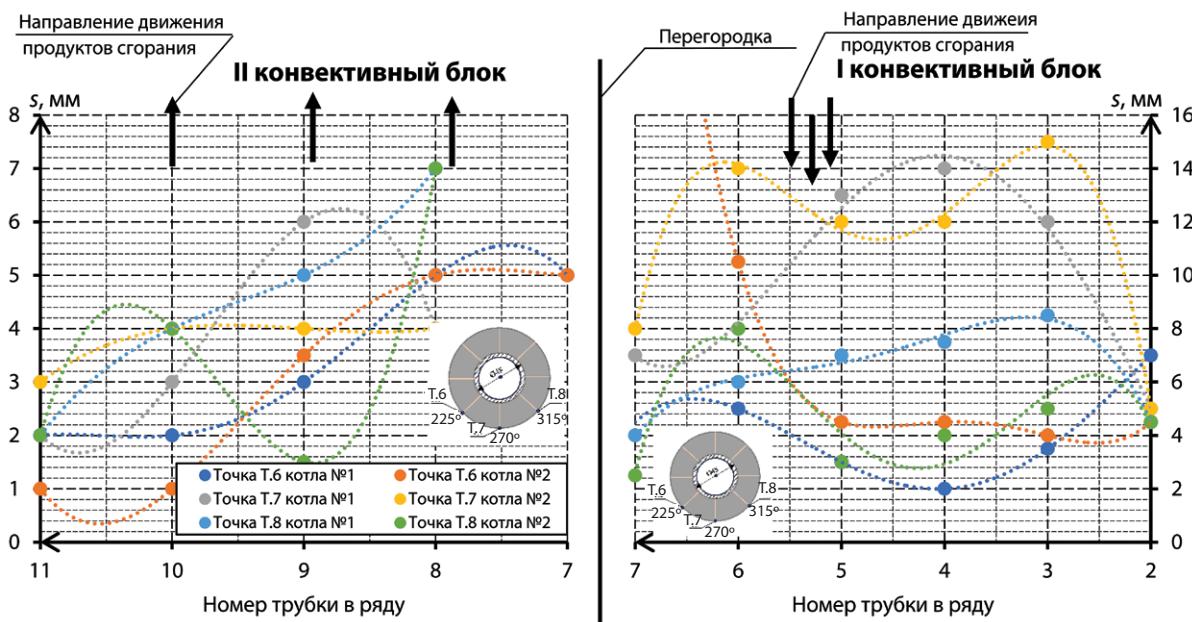


Рис. 8. Зависимости значений толщины отложений золы по ширине конвективного блока для точек T.6, T.7, T.8 (рисунок автора)

Fig. 8. Dependences of ash deposit thickness across the width of the convective section for measurement points T.6, T.7, and T.8 (author's figure)

толщины – 14 и 15 мм, а минимальное – 12 мм. Далее наблюдается резкое снижение толщины слоя до 5 мм (на 66.7 %) при сравнении ее значений с трубками 2 и 3. В то же время у котла 1 наблюдается иная картина распределения толщин: от трубы 6 к трубке 4 выявлено увеличение толщины отложений – с 8 до 14 мм (рост на 6 мм, или на 42.8 %), а затем от трубы 4 до трубы 2 заметно уменьшение толщины слоя золы – с 14 до 5 мм (падение на 9 мм, или на 64.3 %).

Методика, примененная в этой работе, может быть использована во время проведения обследований водотрубных котлов подобной конструкции при наличии ревизионных лючков либо съемных панелей обшивки, позволяющих получить удобный доступ для проведения замеров без механического разрушения накопившихся слоев отложений на близкорасположенных к лючкам рядах труб. По полученным в ходе замеров значениям толщины золовых отложений можно произвести расчеты действительного сопротивления теплопередаче накопившихся на трубах слоев золы, а также действительной температуры стенок конвективных труб; оценить тепловую эффективность работы поверхности нагрева, сравнив с проектными значениями; оценить экономичность работы действующего оборудования с принятыми режимными параметрами; спрогнозировать эффективность применяемого способа очистки поверхностей труб конвективных блоков от загрязнений, периодичности его проведения и в случае необходимости внести корректировки в планы проведения мероприятий по очистке, что позволит добиться эффективной и надежной работы котлоагрегатов. Полученные осредненные значения толщин золы можно использовать для уточнения коэффициента загрязнения, который используется при выполнении поверочных тепловых расчетов по нормативному методу.

#### 4. Заключение / Conclusions

- Полученные данные о толщинах золовых отложений, сформировавшихся в течение отопительного сезона на трубах конвективных пучков котлов КВу-1.0, свидетельствуют о загрязнении конвективных теплообменных поверхностей.

2. Анализ формы отложений позволил выявить трубы с наибольшим и наименьшим слоями отложений золы в различных частях поверхности трубок. Наименьшие осредненные значения толщин отложений зафиксированы у первых и последних трубок в ряду примыкающих к стенкам конвективных блоков. Найдена зависимость увеличения осредненной толщины отложений от крайних трубок в ряду, примыкающих к стенкам, до трубок, располагающихся в непосредственной близости к разделительной перегородке. Подтверждено, что на поверхностях трубок, обращенных в сторону набегающего потока продуктов сгорания, толщина отложений меньше по сравнению с подветренной поверхностью трубы, что свидетельствует о влиянии низкорейнольдсовых течений газового потока в зоне тыльной стороны трубок.
3. Экспериментальное исследование нижнего ряда труб конвективных блоков двух действующих котлоагрегатов позволило построить профили золовых отложений на поверхности трубок, получить зависимости осредненной толщины золовых отложений по ширине конвективных блоков для точек измерений (рис. 2d), которые в дальнейшем помогут уточнить значения коэффициентов загрязнения при составлении тепловых расчетов водотрубных котлов, работающих на угольном топливе.
4. В дальнейшем полученные экспериментальные данные планируется использовать для верификации разработанных численных моделей для прогнозирования формы золовых отложений на конвективных трубках водотрубного котла типа КВу-1.0.



**Конфликт интересов.** Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.  
**Conflict of interest.** The author declares no relevant conflict of interest.

### Список литературы

1. Войцеховская О. К., Каширский Д. Е., Егоров О. В., Шефер О. В. Определение длин волн для дистанционного зондирования горячих продуктов сгорания топлив при атмосферных условиях. *Известия вузов. Физика*. 2015;58(10/3):132–134. <https://www.elibrary.ru/whancp>
2. Перескокова С. А., Копылова Н. С., Яковлева А. Ю. Повышение эффективности конструкции твердотопливных котлов со слоевыми топками. *Вестник гражданских инженеров*. 2014;(6):164–168. URL: <https://www.elibrary.ru/tflogj>
3. Шкаровский А. Л., Гринитлин А. М., Таурит В. Р. Совершенствование использования твердого топлива при слоевом способе сжигания. *Вестник гражданских инженеров*. 2022;(4):125–131. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-4-5-15>
4. Yanguo Zhang, Qinghai Li, Hui Zhou. Chapter 6. Effects of ash deposition and slagging on heat transfer. In: *Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces*. Elsevier; 2016. P. 173–191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800966-6.00006-5>
5. Yanquan Liu, Leming Cheng, Jieqiang Ji, Qinhuai Wang, Mengxiang Fang. Ash deposition behavior of a high-alkali coal in circulating fluidized bed combustion at different bed temperatures and the effect of kaolin. *RSC Advances*. 2018;8(59):33817–33827. <https://doi.org/10.1039/C8RA05997G>
6. Варданян М. А. Ресурсосберегающая и природоохранная деятельность теплоэнергетического предприятия. *Вестник гражданских инженеров*. 2019;(6):228–234. <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-6-228-234>
7. Заворин А. С., Раков Ю. Я. Феноменологические модели образования натрубных отложений в котлах. *Известия Томского политехнического университета*. 2005;(1):144–150. URL: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/567/1/bulletin\\_tpu-2005-308-1-31.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/567/1/bulletin_tpu-2005-308-1-31.pdf)
8. Yang Xin. *Development of ash deposition prediction models through the CFD methods and the ash deposition indice: PhD thesis*. Sheffield; 2016. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/17127/1/Thesis-xy-2017.pdf>
9. Белый В. В., Порозов С. В., Васильев В. В., Дектерев А. А., Тэпфер Е. С. Исследование теплообмена и модернизация топочной камеры котла П-67 блока 800 МВт. *Теплофизика и аэромеханика*. 2007;14(2):299–312. URL: [https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120102&ARTICLE\\_ID=126901](https://www.sibran.ru/journals/issue.php?ID=120102&ARTICLE_ID=126901)

10. Дорфман Ю. В., Горячих Н. В., Батухтин А. Г. Модели поведения углей при разных способах его сжигания и их применение. *Вестник Читинского государственного университета*. 2010;(9):119–125. URL: <https://www.elibrary.ru/nchvmj>
11. Заворин А. С., Раков Ю. Я. Численное моделирование процессов сжигания углей с учетом их минеральной части: состояние вопроса. *Известия Томского политехнического университета*. 2004;(1):122–126. URL: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/221/1/bulletin\\_tpu-2004-307-1-24.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/221/1/bulletin_tpu-2004-307-1-24.pdf)
12. Муканов Р. В., Свинцов В. Я. Разработка и исследование новых методов сжигания жидкого топлива. *Вестник гражданских инженеров*. 2017;(1):182–191. URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/article/razrabotka-i-issledovanie-novyh-metodov-szhiganiya-zhidkogo-topliva>
13. Marangwanda G. T., Madyira D. M., Babarinde T. O. Coal combustion models: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;(1378):032070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/3/032070>
14. Фомичев А. С., Корецкий Д. А., Заворин А. С. Прогнозирование отложений угольной золы в топках энергетических котлов на основе численного моделирования. *Известия Томского политехнического университета*. 2013;(4):35–38. URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/4746?mode=full>
15. Отс А. А. *Процессы в парогенераторах при сжигании сланцев и канского-ачинских углей*. Москва: Энергия; 1977. 312 с. URL: <https://thelib.net/2328232-processy-v-parogeneratorah-pri-szhiganii-slancev-i-kansko-achinskikh-uglej.html>
16. López Ch., Unterberger S., Maier J., Hein K. R. G. Overview of actual methods for characterization of ash deposition. In: *Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications, ECI Symposium Series, Santa Fe, NM, USA, 18–22 May 2003*. <https://dc.engconfintl.org/heatexchanger/38>
17. Kowalczyk-Juśko A. The influence of the ash from the biomass on the power boiler pollution. *Journal of Ecological Engineering*. 2017;18(6):200–204. <https://doi.org/10.12911/22998993/76897>
18. Zhiming Xu, Jinhui Li, Zhimin Han. Numerical study of particle fouling deposition on heat transfer surface. *Energy Storage and Saving*. 2022;1(1):44–52. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2021.11.001>
19. Шерин Е. А. Экономико-географический анализ развития угольного цикла производств Кузбасса. *Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле*. 2014;(10):115–124. URL: <https://izvestiageo.isu.ru/ru/article?id=74>

### References

1. Voitsekhovskaya O. K., Kashirskii D. E., Egorov O. V., Shefer O. V. Determination of wavelengths for remote sensing of hot combustion products of fuel under atmospheric conditions. *Izvestiya vuzov. Fizika*. 2015;58(10/3):132–134. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/whancp>
2. Pereskokova S. A., Kopylova N. S., Yakovleva A. Y. Improving the design efficiency of solid fuel boilers with grate furnaces. *Bulletin of Civil Engineers*. 2014;(6):164–168. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/tflogj>
3. Shkarovskiy A. L., Grimitlin A. M., Taurit V. R. Improving the use of solid fuel in the layered combustion method. *Bulletin of Civil Engineers*. 2022;(4):125–131. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2022-19-4-5-15>
4. Yanguo Zhang, Qinghai Li, Hui Zhou. Chapter 6. Effects of ash deposition and slagging on heat transfer. In: *Theory and Calculation of Heat Transfer in Furnaces*. Elsevier; 2016. P. 173–191. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800966-6.00006-5>
5. Yanquan Liu, Leming Cheng, Jieqiang Ji, Qinhuai Wang, Mengxiang Fang. Ash deposition behavior of a high-alkali coal in circulating fluidized bed combustion at different bed temperatures and the effect of kaolin. *RSC Advances*. 2018;8(59):33817–33827. <https://doi.org/10.1039/C8RA05997G>
6. Vardanyan M. A. Resource-saving and environmental activities of the heat power enterprise. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019;(6):228–234. (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-6-228-234>
7. Zavorin A. S., Rakov Yu. Ya. Phenomenological models of formation of pipe deposits in boilers. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2005;(1):144–150. (In Russ.) URL: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/567/1/bulletin\\_tpu-2005-308-1-31.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/567/1/bulletin_tpu-2005-308-1-31.pdf)
8. Yang Xin. *Development of ash deposition prediction models through the CFD methods and the ash deposition indice: PhD thesis*. Sheffield; 2016. URL: <https://etheses.whiterose.ac.uk/id/eprint/17127/1/Thesis-xy-2017.pdf>
9. Bely V. V., Porozov S. V., Vasiliev V. V., Dekterev A. A., Tepfer E. S. Heat exchange investigation and modernization of furnace of P-67 boiler of 800 MW unit. *Thermophys. Aeromech.* 2007;14:287–299. <https://doi.org/10.1134/S0869864307020151>

10. Dorfman Yu., Goryachikh N., Batukhtin A. Models of conduct of coals with different burning regimes and their application. *Chita State University Journal*. 2010;(9):119–125. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/nchvmj>
11. Zavorin A. S., Rakov Y. Ya. Numerical modelling of coal burning processes with respect to their mineral content. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2004;(1):122–126. (In Russ.) URL: [https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/221/1/bulletin\\_tpu-2004-307-1-24.pdf](https://earchive.tpu.ru/bitstream/11683/221/1/bulletin_tpu-2004-307-1-24.pdf)
12. Mukhanov R. V., Svitsov V. Ya. Development and research of new liquid fuel combustion techniques. *Bulletin of Civil Engineers*. 2017;(1):182–191. (In Russ.) URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/article/razrabotka-i-issledovanie-novyh-metodov-szhiganiya-zhidkogo-topliva>
13. Marangwanda G. T., Madyira D. M., Babarinde T. O. Coal combustion models: A review. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019;(1378):032070. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1378/3/032070>
14. Fomichev A. S., Koretskiy D. A., Zavorin A. S. Prediction of coal ash deposits in power boiler furnaces based on numerical modeling. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*. 2013;(4):35–38. (In Russ.) URL: <https://earchive.tpu.ru/handle/11683/4746?mode=full>
15. Ots A. A. *Processes in steam generators during combustion of oil shale and Kansk-Achinsk coal*. Moscow: Energiya; 1977. 312 p. (In Russ.) URL: <https://thelib.net/2328232-processy-v-parogeneratorah-pri-szhiganii-slancev-i-kansko-achinskikh-uglej.html>
16. López Ch., Unterberger S., Maier J., Hein K. R. G. Overview of actual methods for characterization of ash deposition. In: *Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications, ECI Symposium Series, Santa Fe, NM, USA, 18–22 May 2003*. <https://dc.engconfintl.org/heatexchanger/38>
17. Kowalczyk-Juśko A. The influence of the ash from the biomass on the power boiler pollution. *Journal of Ecological Engineering*. 2017;18(6):200–204. <https://doi.org/10.12911/22998993/76897>
18. Zhiming Xu, Jinhui Li, Zhimin Han. Numerical study of particle fouling deposition on heat transfer surface. *Energy Storage and Saving*. 2022;1(1):44–52. <https://doi.org/10.1016/j.enss.2021.11.001>
19. Sherin E. A. Economic geographical analysis of the development of coal production cycle in Kuzbas. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*. 2014;(10):115–124. (In Russ.) URL: <https://izvestiageo.isu.ru/ru/article?id=74>



### Информация об авторе

**Каштанов Дмитрий Иванович**, аспирант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация, dmitrii.kas@gmail.com

### Information about the author

**Dmitry I. Kashtanov**, Postgraduate Student in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Saint-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint-Petersburg, Russian Federation, dmitrii.kas@gmail.com

Получена 13 октября 2025 г., одобрена 20 ноября 2025 г., принята к публикации 28 ноября 2025 г.

Received 13 October 2025, Approved 20 November 2025, Accepted for publication 28 November 2025

# АСТ

## ПОДПИСКА НА ЖУРНАЛ

**Уважаемые авторы и читатели!**

Вы можете оформить подписку на журнал  
«Архитектура, строительство, транспорт»  
любым удобным для Вас способом:

- через электронный каталог «Пресса России» на сайте [www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru)
- через интернет-магазин «Пресса по подписке» на сайте [www.akc.ru](http://www.akc.ru)



Адрес редакции:  
625001, г. Тюмень,  
ул. Луначарского, 2,  
каб. 117  
Тел.: (3452) 28-37-50  
e-mail: [ast@tyuiu.ru](mailto:ast@tyuiu.ru)

**Подписной индекс  
журнала 79619**

Научная статья / Original article

УДК 625.07

DOI: <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-64-73>

EDN: <https://elibrary.ru/bjboes>

2.1.5 Строительные материалы  
и изделия (технические науки)



## Асфальтобетон с использованием минерального порошка на основе электросталеплавильных шлаков

Т. В. Аниканова<sup>1</sup>✉, А. С. Погромский<sup>2</sup>, Е. А. Лукаш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Москва, Ярославское шоссе, 26, 129337, Российская Федерация

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова  
Белгород, ул. Костюкова, 46, 308012, Российская Федерация

✉ [anik.tv@yandex.ru](mailto:anik.tv@yandex.ru)



**Аннотация.** Применение электросталеплавильных шлаков в дорожном строительстве позволяет снизить стоимость выпускаемой продукции, а также решает важную экологическую проблему, сокращая площади, занятые отвалами. В лабораторных условиях чаще всего ведется разработка рецептур применения электросталеплавильных шлаков в качестве щебня, песка, минерального порошка для асфальтобетонов без учета влияния сроков хранения в отвалах на свойства шлаковых материалов. В процессе длительного хранения шлаков происходят изменения его фазового состава, поэтому использование минерального порошка на основе шлака электросталеплавильного производства текущего выхода и шлака, хранившегося в отвалах более 5 лет, требует предварительного анализа его свойств. Проведена регистрация ИК-спектров битумов после их взаимодействия с минеральными материалами на основе электросталеплавильных шлаков различного срока хранения в отвалах. Исследованы физико-механические характеристики асфальтобетона при введении в его состав шлакового минерального порошка и представлены рекомендации по использованию электросталеплавильных шлаков в дорожном строительстве с учетом процессов старения, происходящих при хранении шлаков в отвалах. ИК-спектроскопия показала, что время хранения шлака в отвалах не оказывает существенного влияния на диффузию легких фракций битума в поры шлакового минерального материала. При применении шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка для асфальтобетона шлаки текущего выхода и шлаки, хранившиеся в отвалах несколько лет, действуют схожим образом, наиболее эффективным будет применение минерального порошка на основе шлака текущего выхода.

**Ключевые слова:** электросталеплавильный шлак, шлак текущего выхода, хранение в отвалах, минеральный порошок

**Для цитирования:** Аниканова Т. В., Погромский А. С., Лукаш Е. А. Асфальтобетон с использованием минерального порошка на основе электросталеплавильных шлаков. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):64–73. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-64-73> EDN: BJBOES

## Asphalt concrete using mineral powder based on electric steelmaking slag

Tatiana V. Anikanova<sup>1</sup>✉, Alexey S. Pogromsky<sup>2</sup>, Evgeny A. Lukash<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
Moscow, 26 Yaroslavskoye Shosse, 129337, Russian Federation

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Belgorod, 46 Kostyukova St., 308012, Russian Federation

✉ anik.tv@yandex.ru

 **Abstract.** The use of electric steelmaking slag in road construction allows decreasing the cost of the produced products, and solves an important environmental problem by reducing the areas occupied by dumps. In laboratory conditions, recipes for using the electric steelmaking slags as crushed stone, sand, and mineral powder for asphalt concrete are most often developed without taking into account the effect of shelf life in dumps on the properties of slag materials. During the long-term storage of slag, its phase composition changes, so the use of mineral powder based on electric steelmaking slag of current output and slag stored in dumps for more than 5 years requires preliminary analysis of its properties. IR spectra of bitumen were recorded after their interaction with mineral materials based on electric steelmaking slags of various shelf life in dumps. The physical and mechanical characteristics of asphalt concrete were examined with the introduction of slag mineral powder into its composition, and recommendations were provided for using electric steelmaking slags in road construction, taking into account the aging processes occurring during the slag storage in dumps. According to IR spectroscopy, the storage time of slag in dumps does not significantly affect the diffusion of bitumen light fractions into the pores of the slag mineral material. When using electric steelmaking slag as a mineral powder for asphalt concrete, current-output slag and slag stored in dumps for several years behave similarly. The most effective approach is to use current-output slag as a mineral powder.

**Keywords:** electric steelmaking slag, current output slag, storage in dumps, mineral powder

**For citation:** Anikanova T. V., Pogromsky A. S., Lukash E. A. Asphalt concrete using mineral powder based on electric steelmaking slag. *Architecture, Construction, Transport.* 2025;5(4):64–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-64-73>



## 1. Введение / Introduction

Применение шлаков в различных отраслях промышленности и строительства позволяет улучшить экологическую обстановку, снизить стоимость выпускаемой продукции, а также сократить площади, занимаемые отвалами. По данным Росприроднадзора, в Российской Федерации площадь территорий, находящихся под свалками и отвалами, составляет более 4 млн га (информация на 2023 г.)<sup>1</sup>. Ежегодно площадь этих территорий увеличивается примерно на 0.4 млн га, что связано в том числе и с увеличением объемов шлаковых отвалов. Хранение шлаков в отвалах не только занимает плодородные территории, но и приводит к загрязнению почв и водоемов. В настоящее время переработанные шлаки широко используются в строительстве, энергетике, сельском хозяйстве. Особенно большое внимание уделяется применению шлаков в дорожном строительстве, этот вопрос, в частности, отражен в работах [1–7].

Наиболее широкое распространение получили доменные шлаки, так как отличаются наиболее стабильными свойствами. Они используются в дорожном строительстве в качестве песка, щебня, минерального порошка [8–10]. В отличие от доменных шлаков, шлаки сталеплавильного производства применяются реже. Это связано с их нестабильными физико-механическими характеристиками,

<sup>1</sup> К 2050 году нелегальные свалки могут занять 1 % площади России. URL: <https://nia.eco/2023/11/10/72705/?ysclid=mhyjmoahte280538603> (дата обращения: 12.08.2025).

которые изменяются в процессе хранения шлаков в отвалах и зависят от многих показателей: скорости охлаждения шлака, его химического состава, структуры, наличия в нем различных добавок, времени выдерживания до полного или частичного силикатного распада ортосиликатов кальция. При охлаждении  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  переходит из  $\beta$ -формы в  $\gamma$ -форму, что сопровождается резким увеличением объема и, следовательно, повышением дисперсности шлаковых частиц. Кроме этого, различия минералогического состава шлаков свежего слива и отвальных шлаков обуславливаются наличием процессов карбонизации свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с образованием мелкодисперсного  $\text{CaCO}_3$ .

В настоящее время использование электросталеплавильных шлаков в слоях оснований дорожных одежд как в чистом виде, так и в составе шлакоизвесткового вяжущего достаточно активно изучается [11, 12]. Исследования [13–19] указывают на большой разброс показателей физико-механических свойств асфальтобетонов, содержащих в своем составе сталеплавильные шлаки, что связано с применением в асфальтобетонных смесях шлаков различного минералогического состава. Следует отметить, что работы, посвященные применению шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка, чаще всего связаны с исследованием конкретного отхода [20–23] и не дают полного представления об изменении свойств в процессе хранения в отвалах.

Цель данной работы заключалась в исследовании свойств асфальтобетона с использованием шлакового минерального порошка с учетом изменения его свойств со временем выдержки в отвалах, а также особенностей его взаимодействия с битумом.

Объектом исследования работы был электросталеплавильный шлак, который является техногенным продуктом сталеплавильного производства Оскольского электрометаллургического комбината (Белгородская область). Этот шлак самопроизвольно измельчается во время хранения в процессе карбонизации в отвалах. Для исследования были отобраны пробы шлака текущего выхода и хранившиеся в отвалах 5, 10 и 18 лет.

Исследование взаимодействия битума с минеральными материалами на основе электросталеплавильных шлаков позволит оценить возможность их использования в дорожном строительстве. Применение шлаков электросталеплавильного производства текущего выхода и хранившихся в отвалах несколько лет в качестве минерального порошка для асфальтобетона приведет к снижению стоимости асфальтобетона, а также к улучшению экологической обстановки в регионах, имеющих отвалы шлака.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Свойства битума и свойства минерального порошка на основе шлаков электросталеплавильного производства определялись в соответствии с требованиями государственных стандартов Российской Федерации. Фактические значения показателей и требования ГОСТ 33133-2014<sup>2</sup> и ГОСТ 52129-2003<sup>3</sup> приведены в таблицах 1 и 2.

Из данных таблицы 2 видно, что минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака текущего выхода, а также на основе шлака, хранившегося в отвалах 5, 10 и 18 лет, соответствует

<sup>2</sup> ГОСТ 33133-2014. Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования = Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Technical requirements. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121335?ysclid=mhyolzo868457384626> (дата обращения: 15.08.2025).

<sup>3</sup> ГОСТ 52129-2003. Государственный стандарт РФ. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия = Mineral powders for asphaltic concrete and organomineral mixtures. Specifications. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034281?ysclid=mhyp0aydb6508554237> (дата обращения: 15.08.2025).

Таблица 1. Свойства битума  
Table 1. Bitumen properties

Наименование показателя	Требования ГОСТ 33133-2014	Фактические значения
Глубина проникания иглы при 25°C, 0.1 мм	71–100	78
Растяжимость при 25 °C, не менее	62	67
Растяжимость при 0 °C, не менее	3.7	5
Температура размягчения по кольцу и шару, °C, не ниже	47	49
Температура хрупкости, °C, не выше	–18	–21
Изменение температуры размягчения после старения, °C, не более	7	3
Индекс пенетрации	от –1.0 до +1.0	–0.4

Таблица 2. Свойства минеральных порошков на основе электросталеплавильных шлаков различного срока хранения в отвалах  
Table 2. Properties of mineral powders based on electric steelmaking slag with various storage durations in dumps

Наименование показателя	Требования ГОСТ 52129-2003	Минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака			
		текущего выхода	5 лет хранения	10 лет хранения	18 лет хранения
Зерновой состав, % по массе: мельче 1.25 мм мельче 0.315 мм мельче 0.071 мм	не менее 95 от 80 до 95 не менее 60	98.15 90.32 79.87	97.41 88.98 76.90	97.21 88.59 77.17	97.20 88.87 77.20
Пористость, %, не более	40	38.45	36.20	36.20	36.20
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	не нормируется	2 010	2 010	2 010	2 010
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	не нормируется	2 800	2 800	2 800	2 800
Показатель битумоемкости, г, не более	80	75.45	70.19	70.15	70.10
Влажность, % по массе, не более	2.5	0.60	0.40	0.40	0.40

требованиям ГОСТ 52129-2003. Величины средней и истинной плотностей материала не изменились с течением времени и составили 2 010 и 2 800 кг/м<sup>3</sup> соответственно. После 5 лет хранения в отвалах показатель пористости для минерального порошка на основе шлака не изменился – 36.20 %. Такая же закономерность наблюдается и с показателем влажности. У минерального порошка на основе шлака после 5, 10 и 18 лет хранения в отвалах влажность снизилась на 33 % (до 0.40 % по массе). Показатель битумоемкости снижался постепенно: с 75.45 г у минерального порошка на основе шлака текущего выхода до 70.10 г у минерального порошка на основе шлака после 18 лет в отвале.

Изучение и регистрация ИК-спектра проводились с помощью прибора Specord 75 IR (производитель – Carl Zeiss, Германия) в области 4 000–400 см<sup>–1</sup>. Все органические соединения, как и все углеводороды, характеризуются полосами поглощения в области частот 2926–2957 см<sup>–1</sup>, которые обусловлены валентными колебаниями связей C–H в метиленовой группе (CH<sub>2</sub>), о наличии ароматических соединений свидетельствует присутствие двойных связей C=C в области 1 600 см<sup>–1</sup>. О содержании нафтеновых углеводородов можно судить по характерному «трезубцу» с частотами в районе 725–810–880 см<sup>–1</sup>.

Для исключения влияния погрешности толщины нанесенной пленки на спектрограммы выбиралась эталонная полоса, относительно которой велась расшифровка и производилась количественная оценка спектра.

Физико-механические характеристики асфальтобетона, содержащего в составе шлаковый минеральный порошок, определялись в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации.

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussions

На рис. 1 приведены ИК-спектры битумов, выделенных из раствора с бензолом после взаимодействия последнего с различными минеральными материалами на основе электросталеплавильных шлаков различного срока хранения в отвале.

Сравнительный анализ ИК-спектров битума показал (рис. 1), что вне зависимости от сроков хранения шлака в отвале избирательной диффузии легких фракций битума в поры шлакового минерального материала не происходит, о чем свидетельствует отсутствие усиления полосы спектра при  $720 \text{ см}^{-1}$ .

По всей видимости, размер и характер расположения пор в шлаковых частицах позволяют говорить о диффузии молекул смол, асфальтенов и, возможно, парафинов в свободные микропоры отдельными сегментами, когда скачкообразные переходы сегментов в новые равновесные положения постепенно приводят к смещению центра тяжести всей молекулы и внедрению компонентов битума в поры материала.

С. И. Самодуров указывает, что, хотя возможность формирования адгезионной связи за счет диффузии целых надмолекулярных образований маловероятна, для битумных пленок на шлаковой подложке характерны вторичные структуры различной степени упорядоченности. Такие пространственные структурные сетки возникают на завершающих этапах формирования адгезионных контактов в системе битум – шлаковые материалы [24].

ИК-спектроскопия показала, что время хранения шлака в отвалах не оказывает существенного влияния на диффузию легких фракций битума в поры шлакового минерального материала. При применении шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка для

асфальтобетона шлаки текущего выхода и хранившиеся в отвалах несколько лет должны действовать схожим образом.

В таблице 3 приведены физико-механические характеристики плотного асфальтобетона типа А марки I при введении в его состав шлакового минерального порошка, изготовленного из шлака текущего выхода и шлака, хранившегося в отвалах 5 и 18 лет.

Физико-механические характеристики асфальтобетона при введении в его состав шлакового минерального порошка разного срока хранения соответствуют требованиям ГОСТ. Средняя плотность асфальтобетона при введении в его состав шлакового минерального порошка практически не изменяется, отклонения от контрольного образца составляют не более 1.3 % (2 420 кг/м<sup>3</sup> у образцов, изготовленных с минеральным порошком на основе электросталеплавильного шлака 18 лет хранения в отвалах). Наибольшее влияние минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака оказал на предел прочности при сжатии при температуре 20 °C, снижение этого показателя в зависимости от шлака достигало от 41 до 44 %, а предел проч-

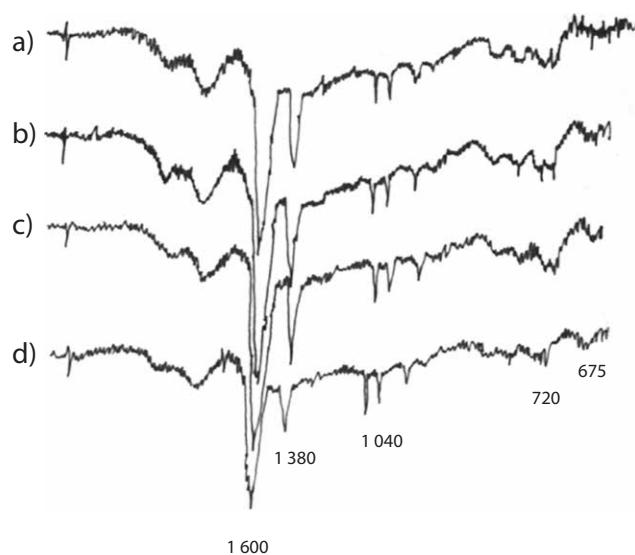


Рис. 1. ИК-спектры битума, снятого с поверхности:  
a) исходного битума; b) гранита; c) шлака свежего  
слива; d) шлака, хранившегося в отвалах  
18 лет (данные сняты авторами с помощью  
прибора Specord 75 IR)

Fig. 1. IR spectra of bitumen from the surface: a) initial bitumen; b) granite; c) current-output slag; d) slag stored in the dump for 18 years (data acquired by the authors using the Specord 75 IR)

Таблица 3. Физико-механические характеристики асфальтобетона при введении  
в его состав шлакового минерального порошка  
Table 3. Physical and mechanical characteristics of asphalt concrete when slag mineral powder  
is introduced into its composition

Наименование показателя	Требования ГОСТ 9128-2013 <sup>4</sup>	Известняковый неактивированный минеральный порошок (контроль- ный образец)	Минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака		
			текущего выхода	5 лет хранения	18 лет хранения
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	не нормируется	2 390	2 410	2 380	2 420
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 20 °C	не менее 2.5	5.4	3.0	3.2	3.1
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 50 °C	не менее 1.1	1.9	2.1	2.0	2.0
Водостойкость	не менее 0.85	0.92	0.90	0.90	0.86
Водостойкость при длительном водонасыщении	не менее 0.85	0.89	0.92	0.91	0.89

сти при сжатии при температуре 50 °C, наоборот, увеличивался до 2.1 МПа (рост 10 %). Возможно, это связано с повышением активности материала при увеличении температуры. Наибольший рост прочности наблюдался при использовании минерального порошка на основе электросталеплавильного шлака текущего выхода.

Показатели водостойкости и водостойкости при длительном водонасыщении<sup>5, 6</sup> при использовании в асфальтобетоне минерального порошка на основе электросталеплавильного шлака ведут себя по-разному. Водостойкость при использовании шлаков снизилась до 0.86 (на 6.5 % по сравнению с контрольным образцом). Водостойкость при длительном водонасыщении или не изменилась (при сравнении контрольного образца и образца с использованием электросталеплавильного шлака 18 лет хранения), или увеличилась до 0.92 и 0.91 у образцов с использованием электросталеплавильного шлака текущего выхода и шлака, хранившегося в отвалах 5 лет соответственно. Возможно, увеличение водостойкости при длительном водонасыщении связано с активностью минерального порошка на основе шлака и, как следствие, повышением его прочности при длительном водонасыщении.

#### 4. Заключение / Conclusions

ИК-спектроскопия образцов битума после взаимодействия с поверхностью различных минеральных материалов показала, что существенных изменений группового химического состава биту-

<sup>4</sup> ГОСТ 9128-2013. Межгосударственный стандарт. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия = asphaltic concrete and polymer asphaltic concrete mixtures, asphaltic concrete and polymer asphaltic concrete for roads and aerodromes. Specifications. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108509?ysclid=mi8huk5thl85917963> (дата обращения: 15.08.2025).

<sup>5</sup> ГОСТ 12801-98. Межгосударственный стандарт. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного строительства. Методы испытаний = Materials on the basis of organic binders for road and airfield construction. Test Methods. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003974> (дата обращения: 18.09.2025).

<sup>6</sup> ГОСТ Р 58401.18-2019. Национальный стандарт РФ. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения водостойкости и адгезионных свойств = Automobile roads of general use. Asphalt mixtures and asphalt concrete for road pavement. Method for determination of water resistance and adhesion properties. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200165767> (дата обращения: 18.09.2025).

ма после взаимодействия с поверхностью электросталеплавильного шлака как текущего выхода, так и отвального не происходит. Некоторое уменьшение характеристических пиков нафтеновых ( $875, 675 \text{ см}^{-1}$ ), ароматических ( $1\,600 \text{ см}^{-1}$ ) соединений и кислотных групп ( $1\,720 \text{ см}^{-1}$ ) (рис. 1) объясняется активным хемосорбционным взаимодействием поверхности шлака с битумом, обусловленным наличием высокоразвитой поверхности, и имеющих основную природу компонентов.

Особенности взаимодействия битума с пористыми материалами, к которым относятся и минеральные материалы, полученные на основе электросталеплавильных шлаков, объясняются, с одной стороны, характером поверхности и структурой адсорбента (размером и расположением пор), а с другой – особенностями битума (активностью и групповым составом). Повышенная пористость шлаковых минеральных материалов не оказывает отрицательного влияния на свойства битума, а следовательно, и на свойства асфальтобетонных смесей на их основе, что объясняется отсутствием процессов избирательной диффузии компонентов битума внутрь частиц минерального материала и интенсификации старения органического вяжущего за счет обеднения адсорбционных слоев на поверхности минеральных частиц смолами и маслами и увеличения концентрации асфальтенов.

При использовании шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка для асфальтобетона шлаки текущего выхода и хранившиеся в отвалах несколько лет действуют схожим образом, так как вне зависимости от сроков хранения шлака в отвале избирательной диффузии легких фракций битума в поры шлакового минерального материала не происходит. Применение шлакового минерального порошка в составе асфальтобетонов в целом не оказывает отрицательного влияния на их физико-механические свойства, все характеристики асфальтобетона соответствуют требованиям ГОСТ. При использовании минерального порошка на основе электросталеплавильного шлака водостойкость при длительном водонасыщении увеличивается. Возможно, это связано с наличием у минерального порошка на основе шлака минералов, которые при длительном водонасыщении гидратируют, что приводит к увеличению прочности образцов. Количество таких минералов снижается в процессе хранения шлаков в отвалах, поэтому при использовании шлака текущего выхода в качестве минерального порошка физико-механические показатели асфальтобетона были выше, чем при использовании шлака, хранившегося в отвалах 5 и 18 лет.

Рекомендуется применение минерального порошка на основе шлака текущего выхода, так как наблюдается повышение некоторых показателей по сравнению с контрольным образцом: увеличивается предел прочности при сжатии при температуре  $50^\circ\text{C}$  и водостойкость при длительном водонасыщении.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contributions.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. New Materials for Road Construction. In: *Parinov I., Chang, Sh., Long, B. (eds.) Advanced Materials. Springer Proceedings in Materials. Vol. 6. Springer, Cham; 2020.* P. 293–307. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2_25)
2. Буравчук Н. И., Гурьянова О. В. Исследование активности минеральных добавок из техногенного сырья. *Экология и промышленность России.* 2021;25(10):26–31. URL: <https://elibrary.ru/iughmn>
3. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. The influence of the activity of the mineral additives on physic-mechanical properties of concrete compositions. In: *Springer Proceedings in Physics. Advanced Materials:*

*Proceedings of the International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications", PHENMA 2018. 2019;224:147–159. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7_13)*

4. Lyapin A. A., Parinov I. A., Buravchuk N. I., Cherpakov A. V., Shilyaeva O. V., Guryanova O. V. Composition and properties of the burnt rocks of nine dumps and ash-slag waste. In: *Improving road pavement characteristics. Applications of industrial waste and finite element modelling. Series: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering*. Springer, Cham; 2020. P. 41–75. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1>
5. Чумаченко Н. Г., Тюрников В. В., Сейкин А. И., Баннова С. Е. Возможности использования горелых пород в строительстве. *Экология и промышленность России*. 2015;19(11):41–46. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-41-46>
6. Balaguero A., Carvajal G. I., Arias Y. P., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. Technical feasibility and life cycle assessment of an industrial waste as stabilizing product for unpaved roads, and influence of packaging. *Science of the Total Environment*. 2019;651(1):1272–1282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.306>
7. Khalifa S. Al-Jabri, Abdullah H. Al-Saidy, Ramzi Taha. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(2):933–938. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090>
8. Зиновьев Д. В., Дюбанов В. Г. Современное состояние и пути переработки доменных шлаков: краткий обзор. *Проблемы черной металлургии и материаловедения*. 2021;2:41–48. URL: <https://elibrary.ru/gotmiv>
9. Кадыров А. С., Кунаев В. А. Перспективные методы повышения физико-механических характеристик доменного шлака для дорожного строительства. *Труды университета*. 2016;(4):54–58.
10. Буланкин Д. А. Обзор международной практики использования различных компонентов стабилизации грунта при строительстве дорожных оснований и грунтовых (промышленных) дорог. *Техника и технологии строительства*. 2024;(1):21–27. URL: <https://elibrary.ru/pwmznt>
11. Ильин С. В., Левашов Г. М., Рощупкин А. Г., Сарычев И. Ю., Фукс А. В. Применение инертных заполнителей из сталеплавильных конвертерных шлаков при изготовлении асфальтобетонных смесей. *Мир дорог*. 2021;(137):105–115. URL: <https://elibrary.ru/wzbbqh>
12. Духовный Г. С., Попков О. В., Логвиненко А. А., Бодяков А. Н., Мешкова К. В. Дорожные одежды с использованием шлаков. *Мир дорог*. 2019;(118):64–65. URL: <https://elibrary.ru/ddivtb>
13. Иванков С. И., Шубов Л. Я., Троицкий А. В., Доронкина И. В., Скобелев К. Д. Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов. Обзор. Часть 1. *Научные и технические аспекты охраны окружающей среды*. 2021;(5):2–100. <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2021-05-1>
14. Oluwasola E. A., Hainin M. R., Aziz M. M. A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*. 2015;2:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
15. Maghool F., Arulrajah A., Du Y.-J., Horpibulsuk S., Chinkulkijniwat A. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017;19:949–958. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6>
16. Агамов Р. Э., Гончарова М. А., Мраев А. В. Стальеплавильные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве. *Строительные материалы*. 2023;(1-2):56–62. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
17. Zhang Xiaolei, Chen Jiaxin, Jiang JingJing, Ji Li, R. D. Tyagi, Rao Y. Surampalli. The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020;42:1321–1334. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00419-y>
18. Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W. K., Ndambuki J. M., Adeboje A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials*. 2017;148:618–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>
19. Погромский А. С., Аниканова Т. В. Влияние длительного хранения электросталеплавильных шлаков в отвалах на их свойства. *Строительные материалы и изделия*. 2018;1(1):32–39. URL: <https://elibrary.ru/xufbud>
20. Гуляк Д. В., Смирнова Д. В. Использование отходов горного производства для совершенствования составов асфальтополимербетона. *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры*. 2018;(1):25–31. URL: <https://elibrary.ru/xsdaok>
21. Тюрюханов К. Ю., Пугин К. Г. Влияние поверхности частиц отработанной формовочной смеси на процессы структурообразования асфальтобетона. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость*. 2019;9(3):566–577. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-566-577>

22. Ядыкина В. В., Гридчин А. М., Кузнецова Е. В., Лебедев М. С. Повышение эффективности минерально-го порошка из техногенного сырья за счет его гидрофобизации. *Строительные материалы и изделия*. 2020;3(4):24–30. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-4-24-30>
23. Артемова А. В. Активированный минеральный порошок на основе металлургических шлаков и его роль в асфальтобетоне. *Леса России и хозяйство в них*. 2009;(1):85–91. URL: <https://elibrary.ru/ruisvz>
24. Самодуров С. И. Асфальтовый бетон с применением шлаковых материалов. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1984. 108 с.

#### References

1. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. New Materials for Road Construction. In: *Parinov I., Chang, Sh., Long, B. (eds.) Advanced Materials. Springer Proceedings in Materials*. Vol. 6. Springer, Cham; 2020. P. 293–307. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2_25)
2. Buravchuk N. I., Guryanova O. V. Research of activity of mineral additives from technogenic raw materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2021;25(10):26–31. (In Russ.) <https://elibrary.ru/iughmn>
3. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. The influence of the activity of the mineral additives on physic-mechanical properties of concrete compositions. In: *Springer Proceedings in Physics. Advanced Materials: Proceedings of the International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications"; PHENMA 2018*. 2019;224:147–159. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7_13)
4. Lyapin A. A., Parinov I. A., Buravchuk N. I., Cherpakov A. V., Shilyaeva O. V., Guryanova O. V. Composition and properties of the burnt rocks of nine dumps and ash-slag waste. In: *Improving road pavement characteristics. Applications of industrial waste and finite element modelling. Series: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering*. Springer, Cham; 2020. P. 41–75. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1>
5. Chumachenko N. G., Tyurnikov V. V., Seikin A. I., Bannova S. E. Usage of combustion metamorphic rocks in the building industry. *Ecology and industry of Russia*. 2015;19(11):41–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-41-46>
6. Balaguero A., Carvajal G. I., Arias Y. P., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. Technical feasibility and life cycle assessment of an industrial waste as stabilizing product for unpaved roads, and influence of packaging. *Science of the Total Environment*. 2019;651(1):1272–1282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.306>
7. Khalifa S. Al-Jabri, Abdullah H. Al-Saidy, Ramzi Taha. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(2):933–938. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090>
8. Zinoveev D. V., Dyubanov V. G. State of the art and prospect for recycling of blast furnace slag – a short review. *Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya [Issues in Ferrous Metallurgy and Materials Science]*. 2021;2:41–48. URL: <https://elibrary.ru/gotmiv>
9. Kadyrov A. S., Kunaev B. A. Promising methods for improving the physico-mechanical characteristics of blast furnace slag for road construction. *Trudy universiteta [Proceedings of the University]*. 2016;(4):54–58. (In Russ.)
10. Bulankin D. A. A review of the international practice for the use of different soil stabilization components in the construction of road bases and oil field (unpaved) roads. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva [Engineering and Construction Technologies]*. 2024;(1):21–27. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/pwmznt>
11. Ilyin S. V., Levashov G. M., Roshchupkin A. G., Sarychev I. Yu., Fuchs A. V. The use of inert aggregates from steelmaking converter slags in the manufacture of asphalt concrete mixtures. *Mir dorog [The world of roads]*. 2021;(137):105–115. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/wzbbqh>
12. Duhovnyj G. S., Popkov O. V., Logvinenko A. A., Bodyakov A. N., Meshkova K. V. Road pavements using slags. *Mir dorog [The world of roads]*. 2019;(118):64–65. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/ddivtb>
13. Ivankov S. I., Shubov L. Ya., Troickij A. V., Doronkina I. V., Skobelev K. D. Rational patented technologies for the processing and disposal of solid industrial waste. Review. Part 1. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy [Scientific and technical aspects of environmental protection]*. 2021;(5):2–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2021-05-1>
14. Oluwasola E. A., Hainin M. R., Aziz M. M. A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*. 2015;2:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
15. Maghool F., Arulrajah A., Du Y.-J., Horpibulsuk S., Chinkulkijniwat A. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017;19:949–958. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6>

16. Agamov R. E., Goncharova M. A., Mraev A. V. Steelmaking slags as an effective raw material in road construction. *Construction materials.* 2023;(1-2):56–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
17. Zhang Xiaolei, Chen Jiaxin, Jiang JingJing, Ji Li, R. D. Tyagi, Rao Y. Surampalli. The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: a review. *Environmental Geochemistry and Health.* 2020;42:1321–1334. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00419-y>
18. Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W. K., Ndambuki J. M., Adeboje A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials.* 2017;148:618–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>
19. Pogromsky A. S., Anikanova T. V. The effect of long-term storage of electric steel smelting slags in dumps on their properties. *Construction Materials and Products.* 2018;1(1):32–39. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/xufbud>
20. Gulyak D., Smirnova D. Investigation of the use of mineral waste waste for improvement of asphaltopolymerbeton compositions. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture.* 2018;(1):25–31. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/xsdaok>
21. Tyuryukhanov K. Yu., Pugin K. G. Impact of the surface of particles of moulding sand on the structural formation of asphalt concrete. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2019;9(3):566–577. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-566-577>
22. Yadykina V. V., Gridchin A. M., Kuznetsova E. V., Lebedev M. S. Increasing the efficiency of mineral powder from technogenic raw materials due to its hydrophobization. *Construction Materials and Products.* 2020;3(4):24–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-4-24-30>
23. Artemova A. V. The activated mineral powder on the basis of metallurgical slags and its role in asphalt concrete. *Forests of Russia and Economy in Them.* 2009;(1):85–91. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/ruisvz>
24. Samodurov S. I. *Asphalt concrete with slag additives.* Voronezh: VSU Publishing House, 1984. 108 p. (In Russ.)



### Информация об авторах

**Анканова Татьяна Викторовна**, канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация, anik.tv@yandex.ru

**Погромский Алексей Сергеевич**, старший преподаватель кафедры автомобильных и железных дорог им А. М. Гридинина, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, pogrom7@yandex.ru

**Лукаш Евгений Алексеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А. М. Гридинина, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, svh8@yandex.ru

### Information about the authors

**Tatiana V. Anikanova**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Architectural and Construction Design and Physics of the Environment, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation, anik.tv@yandex.ru

**Alexey S. Pogromsky**, Senior Lecturer in the Department of Automobile and Railway Engineering named after A. M. Gridchin, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, pogrom7@yandex.ru

**Evgeny A. Lukash**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Automobile and Railway Engineering named after A. M. Gridchin, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, svh8@yandex.ru

Получена 29 сентября 2025 г., одобрена 17 ноября 2025 г., принята к публикации 30 ноября 2025 г.

Received 29 September 2025, Approved 17 November 2025, Accepted for publication 30 November 2025



## Механические характеристики вязкоупругого водонасыщенного основания

Т. В. Крижанивская<sup>1</sup>✉, В. В. Воронцов<sup>1</sup>, Б. А. Тайех<sup>2</sup>, Ф. С. Куличенко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Тюменский индустриальный университет

Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

<sup>2</sup> Исламский университет Газы

Газа, ул. Гамала Абдель Насера, Палестина

<sup>3</sup> Российский университет дружбы народов им. Патриса Лумумбы

Москва, ул. Миклухо-Маклая, 6, 117198, Российская Федерация

✉ [krizhanivskajatv@tyuiu.ru](mailto:krizhanivskajatv@tyuiu.ru)



**Аннотация.** При проектировании зданий и сооружений на слабых водонасыщенных грунтах необходимо выполнять расчет напряженно-деформированного состояния основания с учетом ползучести. Это позволяет прогнозировать развитие деформаций во времени, перераспределять усилия, вызванные ползучестью, для повышения надежности и долговечности конструкций, а также помогает снизить риск возникновения аварийных ситуаций. В работе был выполнен расчет напряженно-деформированного состояния вязкоупругого основания по кинематической модели грунта в рамках линейной наследственной теории вязкоупругости. Экспериментальные графики изменения поровых давлений и осадки штампа были представлены как функции времени с помощью метода ломаных Л. Е. Мальцева. Все результаты проиллюстрированы графиками. Показана методика получения оригинала от известного изображения. Определены механические вязкоупругие характеристики по кинематической модели грунта. Используя полученные данные, в дальнейшем можно определить развитие осадки во времени для вязкоупругих водонасыщенных оснований.

**Ключевые слова:** водонасыщенное основание, механические вязкоупругие характеристики, вязкоупругие свойства грунта, функции изображения и оригинала, метод ломаных, ползучесть

**Для цитирования:** Крижанивская Т. В., Воронцов В. В., Тайех Б. А., Куличенко Ф. С. Механические характеристики вязкоупругого водонасыщенного основания. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):74–85. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-74-85> EDN: AEVHFT

## Mechanical characteristics of viscoelastic water-saturated foundation

Tatiana V. Krizhanivskaya<sup>1</sup>✉, Viacheslav V. Vorontsov<sup>1</sup>, Bassam A. Tayeh<sup>2</sup>, Faina S. Kulichenko<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Industrial University of Tyumen

Tyumen, 38 Voldodarskogo St., 625000, Russian Federation

<sup>2</sup> Islamic University of Gaza,

Gaza, Gamal Abdel Nasser St., Palestine

<sup>3</sup> Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba

Moscow, 6 Miklukho-Maklaya St., 117198, Russian Federation

✉ [krizhanivskajatv@tyuiu.ru](mailto:krizhanivskajatv@tyuiu.ru)

**Abstract.** When designing buildings and structures on soft water-saturated soils, it is necessary to calculate the stress-strain state of the foundation with creep. This allows us to predict the development of deformations over time, redistribute creep-induced forces to improve the reliability and durability of structures, and helps reduce the risk of emergencies. This study calculated the stress-strain state of a viscoelastic foundation using a kinematic soil model within the framework of the linear hereditary theory of viscoelasticity. Experimental graphs of pore pressure changes and stamp settlement were presented as time functions using broken-line method by L. E. Maltsev. All results are illustrated by graphs. A methodology for obtaining the original function from a transform is shown. Mechanical viscoelastic characteristics were determined according to the kinematic soil model. Using the obtained data, it is possible in the future to determine the development of settlement over time for viscoelastic water-saturated foundations.

**Keywords:** water-saturated foundation, mechanical viscoelastic characteristics, viscoelastic properties of soil, image and original functions, broken line method, creep

**For citation:** Krizhanivskaya T. V., Vorontsov V. V., Tayeh B. A., Kulichenko F. S. Mechanical characteristics of viscoelastic water-saturated foundation. *Architecture, Construction, Transport.* 2025;5(4):74–85. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-74-85>

## 1. Введение / Introduction

Строительство гражданских, промышленных зданий и сооружений, объектов нефтегазодобывающего комплекса в Западной Сибири ведется в сложных инженерно-геологических условиях на толщах слабых, полностью водонасыщенных глинистых грунтов, на заболоченных и заторфованных территориях, где водосток практически отсутствует.

При проектировании новых инженерных объектов и обследовании существующих зданий и сооружений на слабых водонасыщенных грунтах одной из основных задач является определение изменения деформаций основания во времени для того, чтобы оценить и предотвратить возможное разрушение объектов, обеспечить надежность и долговечность зданий и сооружений. Решение этой задачи возможно только посредством методов математического моделирования ползучести.

Для описания изменения деформации во времени (ползучести) существует достаточно много моделей. В основу теории упругопластического упрочняющего тела, которая позволяет учесть пластические деформации до момента наступления предельного состояния, легли разработки D. C. Drucker, R. E. Gibson, D. Henkel [1]. Дальнейшее развитие эта теория получила в работах З. Г. Тер-Мартиросяна [2–4], В. Н. Широкова [5], А. С. Жакулина [6], М. Ю. Абелева [7], А. Г. Шашкина [8], J. C. Liu [9], X.-M. Li [10] и других авторов.

Теория фильтрационной консолидации, которая описывает деформирование во времени полностью водонасыщенных грунтов, впервые была предложена К. Терцаги в 1925 г. и получила развитие в работах Н. М. Герсеванова (1931–1948 гг.), В. А. Флорина (1937–1961 гг.), Н. А. Цытовича (1940–1984 гг.), З. Г. Тер-Мартиросяна (1986–2022 гг.).

Следует отметить, что базовые нормативные документы по проектированию оснований и фундаментов (СП 22.133330<sup>1</sup>), в частности свай (СП 24.13330<sup>2</sup>), не предписывают обязательный рас-

<sup>1</sup> СП 22.13330.2016 Основания зданий и сооружений = Soil bases of buildings and structures. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\*. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054206> (дата обращения: 07.08.2025).

<sup>2</sup> СП 24.13330.2021 Свайные фундаменты = Pile foundations. URL: <https://docs.cntd.ru/document/728474148> (дата обращения: 07.08.2025).

чет прочности и деформаций основания фундаментов с учетом вязкоупругих свойств, однако в СП 267.1325800.2016<sup>3</sup> при проектировании высотных зданий требуется осуществлять прогноз осадок во времени на весь период эксплуатации объекта. Важно на данном этапе определить дальнейший путь обеспечения надежности зданий и сооружений: либо продолжить в основном блоке задач применять только коэффициенты надежности, игнорируя выполнение расчета осадок во времени, либо перейти к более трудоемкому, но надежному подходу – проведению расчетов осадок во времени с учетом фильтрационной и вторичной консолидации, реологических характеристик грунтов.

Согласно ГОСТ 26447-85<sup>4</sup>, для изучения реологических свойств грунтов проводится испытание образца ненарушенной структуры малой высоты в условиях одноосного сжатия. Вследствие этого двухфазный образец переходит в однофазный, так как поровая вода после конечного отрезка времени полностью сбрасывает с себя нагрузку. Однако результаты натурных и лабораторных экспериментов, в частности [11–13], показывают, что на удалении от уровня планировочной отметки земли поровая вода воспринимает значительную часть напряжений и после окончания процесса консолидации. В связи с этим целесообразно при расчете напряженно-деформированного состояния водонасыщенных оснований одновременно учитывать ползучесть скелета и сжимаемость поровой жидкости, что дает качественно новые результаты по сравнению с теорией Терцаги-Герсеванова, наиболее приближенные к экспериментальным данным.

Расчет любого объекта начинается с выбора определенной модели, основанной на тех или иных гипотезах или предположениях. В механике грунтов большинство моделей прогноза длительных осадок базируется на феноменологическом представлении о взаимодействии грунтового основания с фундаментом зданий и сооружений, насыпей автомобильных и железных дорог. С учетом того, что определение осадки на достаточно большом промежутке времени (месяцы, годы) является нелинейной задачей, применение вышеуказанного подхода требует дальнейшего совершенствования. Одним из направлений является исследование вязкоупругих механических характеристик грунта по кинематической модели Л. Е. Мальцева, Т. В. Мальцевой [14].

В качестве объекта исследования был принят образец из водонасыщенного суглинка; эксперимент с ним ( проведен одним из авторов данного исследования и описан в работе [15]) был обработан для определения механических вязкоупругих характеристик грунта.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Испытаниям подвергался крупногабаритный двухфазный образец размером  $1.25 \times 1.25$  м в плане высотой  $H = 1.0$  м. Образец был помещен в лоток с водонепроницаемыми стенками и дном. К загружающему штампу было приложено рабочее давление  $\sigma_0 = 0.0046$  МПа.

Датчики для измерения поровых давлений и перемещений располагались в двух уровнях (рис. 1) на глубине  $z = 0.3$  м и  $z_1 = 0.6$  м от дневной поверхности.

Особенность эксперимента заключалась в следующем:

- над поверхностью образца был создан водяной замок высотой 3 см для поддержания влажности образца;

<sup>3</sup> СП 267.1325800.2016. Здания и комплексы высотные. Правила проектирования = High rise buildings and complexes. Design rules. URL: <https://docs.cntd.ru/document/456044284> (дата обращения: 10.08.2025).

<sup>4</sup> ГОСТ 26447-85. Породы горные. Метод определения механических свойств глинистых пород при одноосном сжатии = Rocks. Method for determination of mechanical properties for unconfined compressive strength of clay rocks. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200023985> (дата обращения: 07.07.2025).

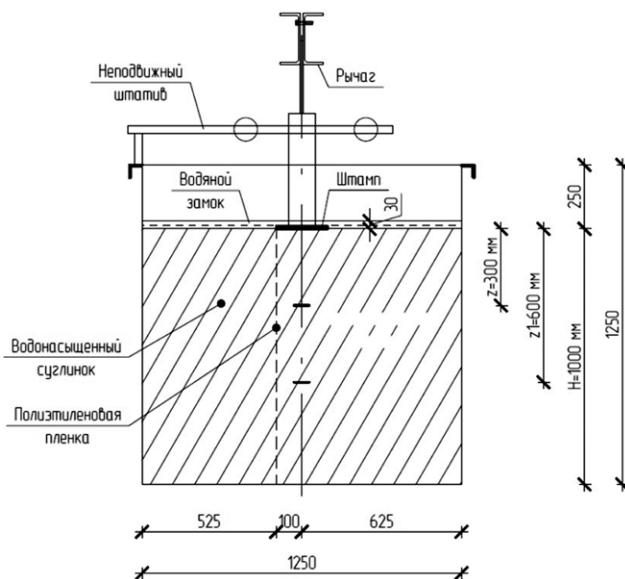


Рис. 1. Схема экспериментальной установки с расположением датчиков (рисунок авторов)

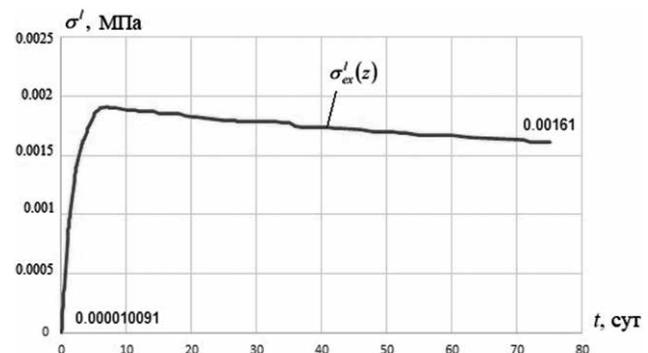
Fig. 1. Experimental setup scheme with sensors (authors figure)

- для устранения сил трения, возникающих между стенками лотка и испытуемым грунтом, выполнялось армирование легкодеформируемой полиэтиленовой пленкой;
- между пленкой и образцом наносилась смазка (литол), что позволяло грунту перемещаться под нагрузкой вместе с пленкой. Максимальное поровое давление по окончании эксперимента (80 суток) составило 35 % от рабочего давления.

По данным эксперимента [15] были построены график изменения поровых давлений во времени (рис. 2) и график осадки штампа (рис. 3) для датчика № 20 ( $z = 0.3$  м), анализ которых проводился с использованием метода линейной комбинации на предмет получения вязкоупругих характеристик.

Определение механических вязкоупругих характеристик кинематической модели грунта проводится путем обработки экспериментальных данных в рамках линейной наследственной теории вязкоупругости<sup>5</sup>. Алгоритм решения включает следующие этапы:

1. Экспериментальные данные представляются как функции времени в виде специальной ломаной линии (сплайн порядка I дефекта I).
2. С помощью переобозначений Вольтерра записывается изображение по Лапласу – Карсону.



Индекс «*ex*» происходит от слова *experiment* (эксперимент)

Рис. 2. График изменения порового давления во времени, полученный по данным датчика № 20 (график составлен авторами)

Fig. 2. Graph of pore pressure change over time for sensor No. 20 (graph constructed by the authors)

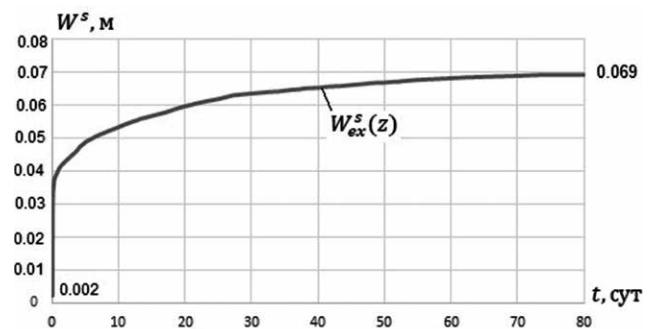


Рис. 3. Экспериментальный график осадки штампа для датчика № 20 (график составлен авторами)

Fig. 3. Experimental graph of stamp settlement for sensor No. 20 (graph constructed by the authors)

<sup>5</sup> Огибалов П. М., Ломакин В. А., Кишкин Б. П. Механика полимеров. Москва: ИМУ; 1975. 528 с.

Ильюшин А. А., Победря Б. Е. Основы математической теории термовязкоупругости. Москва: Наука; 1970. 280 с.

3. Вводится специализированный сплайн (ломаная линия), оригинал которой необходимо найти, и осуществляется приближенный переход от известного изображения к искомому оригиналу для фиксированных в пространстве точек совпадений (коллокаций) по методу ломаных Л. Е. Мальцева [14]. В результате получается система линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Важно отметить, что назначение точек коллокаций существенно влияет на точность решения системы уравнений [16].
4. В результате решения СЛАУ высчитываются искомые параметры ломаной линии и определяются механические вязкоупругие характеристики грунта.

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Выполним обработку экспериментальных данных для получения механических вязкоупругих характеристик.

Сначала получим функцию времени для поровых давлений:

$$\sigma' (t) = \sigma(0) \cdot \left[ 1 - \sum_{i=0}^{10} (c_i - c_{i+1}) \cdot (t - t_i^\sigma) \cdot h(t - t_i^\sigma) \right], \quad (1)$$

которая имеет запись в изображениях по Лапласу – Карсону:

$$[\sigma'(t)]^* = [\sigma']^*(p) = \sigma(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^{10} c_i \cdot \frac{1}{p} \left( e^{-p \cdot t_{i-1}^\sigma} - e^{-p \cdot t_i^\sigma} \right) \right]. \quad (2)$$

где  $c_i$  – искомые параметры, определяемые методом наименьших квадратов (МНК);

$c_0 = c_{11} = 0$ ;

$t_i^\sigma$  – фиксированные моменты времени, соответствующие функции  $\sigma'$ ,  $t_o^\sigma = 0$ ;

$\sigma(0) = 0.0000010091$  МПа – значение напряжения при  $t_o^\sigma = 0$ .

Подробно процесс получения функции времени для поровых давлений в оригиналe и изображении для данного эксперимента приведен в работе [17].

На рис. 4 приведены графики функций оригинала  $\sigma'(t)$  (1) и изображения  $[\sigma']^*(p)$  (2). Начальный временной участок графиков для наглядности показан отдельно.

По полученному изображению (2) определим универсальный параметр кинематической модели в изображениях:

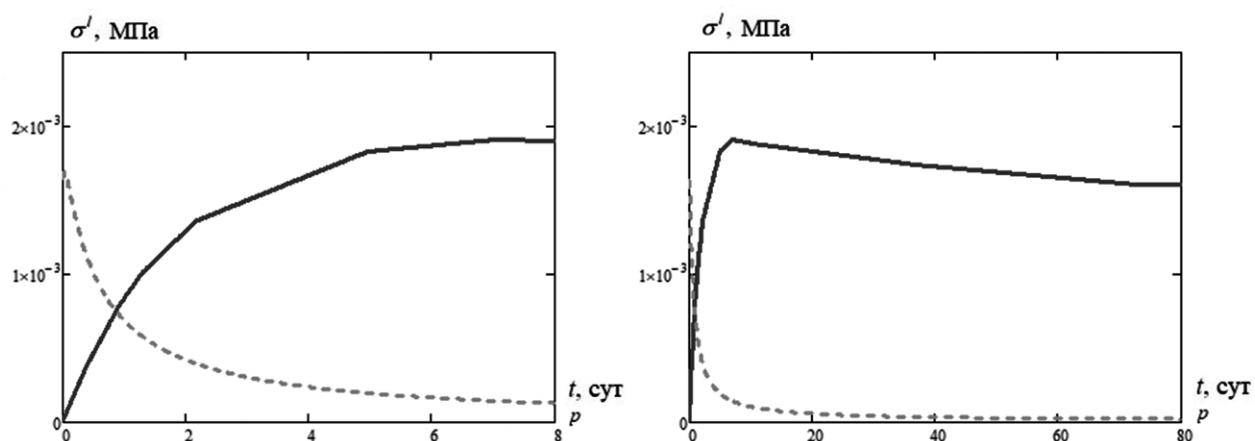


Рис. 4. Графики функций: оригинала  $\sigma'(t)$  (—) и изображения  $[\sigma']^*(p)$  (---) (график составлен авторами)  
Fig. 4. Functions graphs: original  $\sigma'(t)$  (—) and transform  $[\sigma']^*(p)$  (---) (graph constructed by the authors)

$$\left[ a^2 \right]^* (p) = -\frac{1}{z_i} \cdot \ln \left[ 1 - \frac{\left[ \sigma' \right]^* (z_i, p)}{\sigma_o} \right].$$

Наличие второй степени означает, что в упругой постановке параметр  $a^2$  всегда имеет положительное значение.

Переход от изображения к оригиналу выполняем по методу ломаных.

Подробно процесс получения механической вязкоупругой характеристики (универсального параметра кинематической модели)  $a^2$  описан в работе [16].

На рис. 5 показан график механической вязкоупругой характеристики  $a^2(t)$ .

Механическую характеристику  $1/E^s$  определим по экспериментальному графику осадки штампа  $W_{ex}^s$  (рис. 3). Для этого по данным графика выберем необходимые значения и сведем их в таблицу 1. При назначении характерных временных отрезков важно учитывать, что график осадки штампа имеет резко возрастающее изменение значений на начальном временном участке, поэтому необходимо принять максимальное значение точек в начальный временной период.

На основании данных таблицы 1 запишем специальную ломаную линию (рис. 6):

$$W^s(t) = W(0) \cdot \left[ 1 - \sum_{i=0}^{10} (b_i - b_{i+1}) \cdot (t - t_i^w) \cdot h(t - t_i^w) \right], \quad (7)$$

где  $b_i$  – искомые параметры, определяемые методом наименьших квадратов (МНК);

$b_o = b_8 = 0$ ;

$t_i^w$  – фиксированные моменты времени, соответствующие функции  $W^s$ ,  $t_o^w = 0$ ;

$W(0) = 0.002$  м – значение осадки штампа в начальный момент времени.

Для 10 звеньев ломаной (7) определим значения безразмерных параметров исходя из формул

$$W(0) \cdot b_i = \operatorname{tg} \alpha_i; \quad b_i = \frac{\operatorname{tg} \alpha_i}{W(0)}:$$

$b_0 = 0$ ;  $b_1 = 323.741$ ;  $b_2 = 51.81598$ ;  $b_3 = 11.01796$ ;  $b_4 = 3.467742$ ;  $b_5 = 1.559343$ ;  $b_6 = 0.963333$ ;  $b_7 = 0.349197$ ;  
 $b_8 = 0.094337$ ;  $b_9 = 0.0325$ ;  $b_{10} = 0$ .

Таблица 1. Значение осадки штампа

для звеньев ломаной линии

Table 1. The value of the stamp draft  
 for broken line links

Время $t$ , сут	Осадка штампа $W^s$ , м
0	0.002
0.0417	0.029
0.083	0.03328
0.25	0.03696
0.374	0.03782
1.958	0.04276
4.958	0.04854
22.083	0.0605
63	0.06822
75	0.069
80	0.069

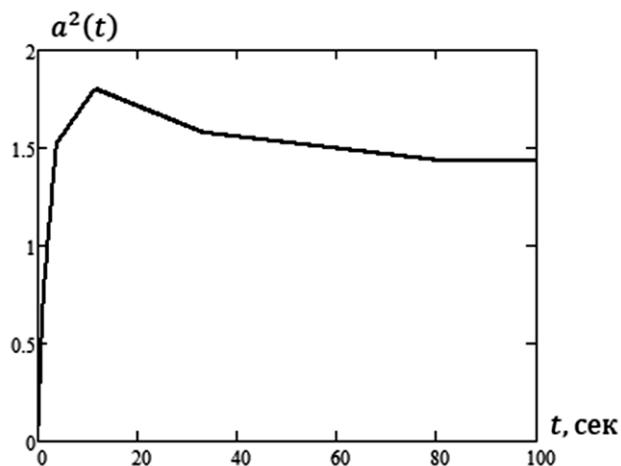


Рис. 5. График функции  $a^2(t)$   
 (график составлен авторами)  
 Fig. 5. Graph of the function  $a^2(t)$   
 (graph constructed by the authors)

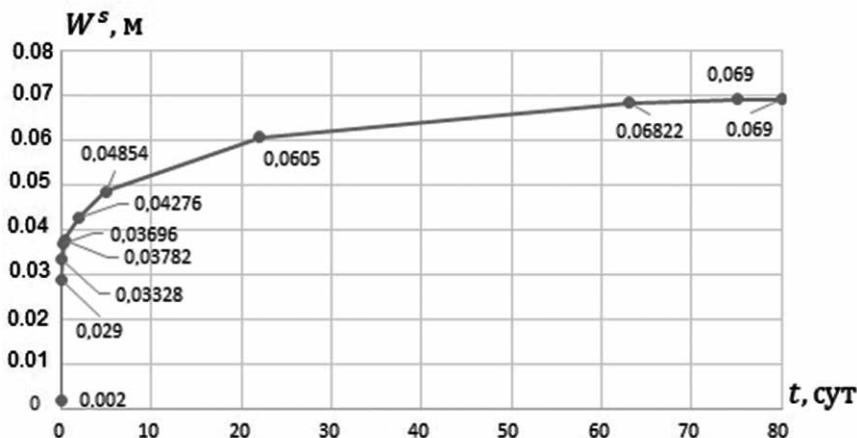


Рис. 6. График осадки штампа в виде ломаной линии (график составлен авторами)  
Fig. 6. Stamp draft graph in the view of broken line (graph constructed by the authors)

Запишем изображение функции (7) по Лапласу – Карсону с теми же параметрами  $W(0), b_1, \dots, b_n$ :

$$[W^s(t)]^* = [W^s]^*(p^w) = W(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^{10} b_i \cdot \frac{1}{p^w} (e^{-p^w \cdot t_{i-1}^w} - e^{-p^w \cdot t_i^w}) \right]. \quad (8)$$

Параметры  $b_1, \dots, b_n$  известны из (7).

На рис. 7 покажем графики от оригинала  $W^s(t)$  (7) и изображения  $[W^s]^*(p^w)$  (8).

В кинематической модели грунта [14] используемые в теории вязкоупругости функции ползучести  $\Pi(t)$  и релаксации  $R(t)$ , записываются следующим образом:

$$\Pi^s(t) = 1/E^s(t); \quad R^s(t) = E^s(t).$$

Искомая механическая вязкоупругая характеристика  $\frac{1}{E^s}(t)$  количественно описывает свойство вязкоупругого материала накапливать деформацию при постоянной нагрузке, определяется на основании формулы для вычисления осадки [15]:

$$\frac{1}{E^s} = \frac{W_{ex}^s \cdot a^2}{\sigma_o \cdot (1 - e^{-a^2 \cdot H})},$$

и имеет запись в изображениях:

$$\begin{aligned} \left[ \frac{1}{E^s}(t) \right]^* &= \left[ \frac{1}{E^s} \right]^*(p) = [ \Pi^s ]^*(p) = \\ &= \frac{[ W_{ex}^s(t) ]^* \cdot [ a^2(t) ]^*}{\sigma_o \cdot \left( e^{-[ a^2(t) ]^* \cdot z} - e^{-[ a^2(t) ]^* \cdot H} \right)}, \end{aligned} \quad (9)$$

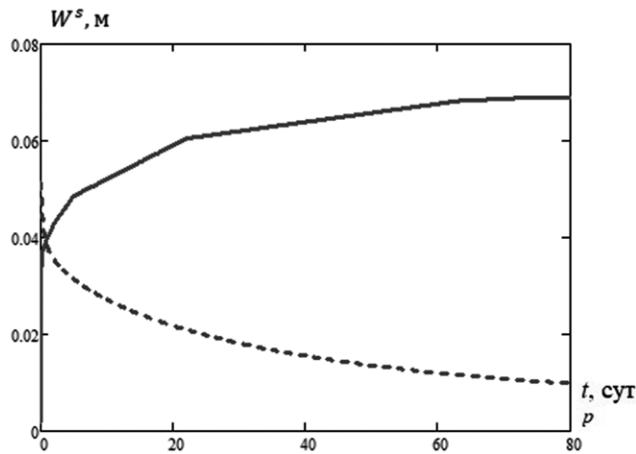


Рис. 7. Графики функций: оригинала  $W^s(t)$  (—) и изображения  $[W^s]^*(p^w)$  (---) (график составлен авторами)  
Fig. 7. Functions graphs: original  $W^s(t)$  (—) and transform  $[W^s]^*(p^w)$  (---) (graph constructed by the authors)

где  $[\bar{a}^2(t)]^* = [\bar{a}^2]^*(p^a) = a(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^8 d_i \cdot \frac{1}{p^a} (e^{-p^a \cdot t_{i-1}^a} - e^{-p^a \cdot t_i^a}) \right]$  – изображение функции  $a^2(t)$ , параметры которого определены в [17];  
 $\sigma_o = 0.0046$  МПа – нагрузка на штамп;  
 $z = 30$  см – глубина заложения датчика;  
 $H = 1$  м.

Так как изображения  $[a^2(t)]^* = [a^2]^*(p)$  [17] и  $[W_s^{\text{ex}}(t)]^* = [W^s]^*(p^w)$  являются известными функциями, то выражение (9) также становится известной функцией, определив оригинал которой, получим функцию времени для параметра  $\frac{1}{E^s}$ .

Выполним переход от известного изображения (9) к оригиналу, как было сделано для  $a^2$  [17], по методу ломаных Л. Е. Мальцева [14].

Введем специализированный сплайн (ломаную линию), который аппроксимирует оригинал  $W^s$

$$\overline{\Pi^s}(t) = \Pi^s(0) \cdot \left[ 1 - \sum_{i=0}^8 (k_i - k_{i+1}) \cdot (t - t_i^w) \cdot h(t - t_i^w) \right] \quad (10)$$

и имеет запись в изображениях

$$[\overline{\Pi^s}(t)]^* = [\overline{\Pi^s}]^*(p^w) = a(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^8 k_i \cdot \frac{1}{p^w} (e^{-p^w \cdot t_{i-1}^w} - e^{-p^w \cdot t_i^w}) \right], \quad (11)$$

где  $k_0 = k_9 = 0$ ,

$t_i^w$  – моменты времени, соответствующие функции  $W^s$ ,  $t_0^w = 0$ ;

$p^w$  – точки коллокаций (совпадений) для функции  $W^s$ ;

$\Pi^s(0)$  и  $k_i$  – искомые параметры, определяемые по методу ломаных Л. Е. Мальцева из условия совпадения искомой аппроксимации  $[\overline{\Pi^s}]^*(p^w)$  (11) с заданной функцией  $[\Pi^s]^*(p)$  (9):

$$[\overline{\Pi^s}]^*(p^w) = [\Pi^s]^*(p)$$

на системе точек коллокаций  $\{p_j^w\}_{j=1}^{j=8}$ .

В результате получаем систему линейных алгебраических уравнений (СЛАУ):

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^8 k_i \cdot (e^{-p_j^w \cdot t_{i-1}^w} - e^{-p_j^w \cdot t_i^w}) = \left[ \frac{[\Pi^s]^*(p_j)}{\Pi^s(0)} - 1 \right] \cdot p_j^w \\ \sum_{i=1}^8 k_i \cdot (t_i^w - t_{i-1}^w) = \left[ \frac{[\Pi^s]^*(p=0)}{\Pi^s(0)} - 1 \right] \end{cases}.$$

Последнее уравнение СЛАУ записывается специальным образом для точки  $p=0$  или для точки  $t=\infty$  в оригиналe.

При  $p=\infty$  сразу определяем параметр  $\Pi^s(0)$ :

$$\begin{aligned} [\overline{\Pi^s}]^*(p^w = \infty) &= [\Pi^s]^*(p = \infty); \\ [\overline{\Pi^s}]^*(p^w = \infty) &= \Pi^s(0) \cdot \left[ 1 + \sum_{i=1}^8 k_i \cdot \frac{1}{\infty} (e^{-\infty \cdot t_{i-1}^w} - e^{-\infty \cdot t_i^w}) \right] = \Pi^s(0), \\ [\Pi^s]^*(p = \infty) &= \frac{[W_s^{\text{ex}}]^*(p = \infty) \cdot [a^2]^*(p = \infty)}{\sigma_o \cdot \left( e^{-[a^2]^*(p = \infty) \cdot z} - e^{-[a^2]^*(p = \infty) \cdot H} \right)}; \\ [a^2]^*(p = \infty) &= [a^2](t = 0) = a(0); \quad [W_s^e x]^*(p = \infty) = [W_s^e x](t = 0) = W(0). \end{aligned}$$

Расчет выполняем по осадке штампа, который расположен сверху над образцом на глубине  $z=0$ , поэтому

$$[\Pi^s]^*(p=\infty) = \frac{W(0) \cdot a(0)}{\sigma_o \cdot (e^{-a(0) \cdot z} - e^{-a(0) \cdot H})} = \frac{0.002 \cdot 0.007320351}{0.0046 \cdot (e^{-0.007320351 \cdot 0} - e^{-0.007320351 \cdot 1})} = 0.436375931 \left( \frac{1}{MPa} \right).$$

Точки коллокаций  $p_j^w$  назначаем из решения трансцендентного уравнения [18]:

$$m \left( e^{-p_j^w \cdot t_{j-1}^w} - e^{-p_j^w \cdot t_j^w} \right) = \left( e^{-p_j^w \cdot t_j^w} - e^{-p_j^w \cdot t_{j+1}^w} \right),$$

согласно которому наддиагональные элементы матрицы составляют 0.8 от диагональных [16].

В результате решения СЛАУ определяем искомые параметры  $k_i$ :

$k_1 = 207.7841960474$ ;  $k_2 = 329.2237116718$ ;  $k_3 = 7.2229179441$ ;  $k_4 = 7.5448590342$ ;  $k_5 = 7.2298796519$ ;  
 $k_6 = 1.5074320511$ ;  $k_7 = -0.458903743$ ;  $k_8 = -0.0275651823$ .

На рис. 8 приведены графики функции ползучести скелета  $[\Pi^s]^*(p)$  и  $\Pi^s(t)$ .

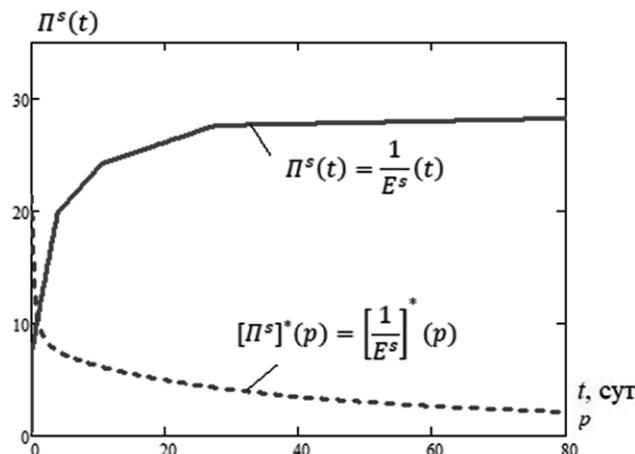


Рис. 8. Графики функций ползучести: оригинала  $\Pi^s(t)$  (—) и изображения  $[\Pi^s]^*(p)$  (---)  
(график составлен авторами)

Fig. 8. Graphs of creep functions: original  $\Pi^s(t)$  (—) and images  $[\Pi^s]^*(p)$  (---)

для расчета напряженно-деформированного состояния вязкоупругого водонасыщенного основания, загруженного полосовой нагрузкой.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contributions.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Drucker D. C., Gibson R. E., Henkel D. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. *American Society of Civil Engineers*. 1957;122(1). <https://doi.org/10.1061/taceat.0007430>
2. Тер-Мартиросян З. Г. Прогноз механических процессов в массивах многофазных грунтов. Москва: Недра; 1986. 292 с.

3. Тер-Мартиросян З. Г., Тер-Мартиросян А. З., Лузин И. Н. Напряженно-деформированное состояние конечной прямоугольной области под действием равномерно распределенной полосовой нагрузки. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2018;(2):6–13. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=35417650>
4. Тер-Мартиросян З. Г., Филиппов К. А. Решение задачи осадки свай под действием вертикальной статической нагрузки с учетом пластических свойств грунтов основания. *Вестник МГСУ*. 2022;17(7):871–881. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.7.871-881>
5. Широков В. Н., Заболоцкая А. А. Опыт определения деформационных характеристик глинистых грунтов в условиях компрессионного сжатия статическим нагружением и в режиме релаксации напряжений. *Вестник Филиала Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова в городе Душанбе*. 2021;(3):115–127. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47473814>
6. Жакулин А. С., Жакулина А. А., Жусупбеков А. Ж., Нефедов В. Н., Тунгатаров А. М., Попов Н. И. Прогноз осадок фундаментов по упругопластической модели глинистых грунтов. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2022;(3):6–9. <https://ofmg.ru/index.php/ofmg/article/view/6535>
7. Абелев М. Ю., Аверин И. В., Абелев К. М., Чунюк Д. Ю., Алмазов А. А. *Строительство на слабых водонасыщенных глинистых грунтах*. Москва: Издательство АСВ, 2023. 170 с. ISBN 978-5-4323-0483-4. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54107159>
8. Шашкин А. Г., Шашкин К. Г., Васенин В. А. О предсказательной способности моделей механики грунтов. В сб.: *Сергеевские чтения. Фундаментальные и прикладные вопросы современного грунтоведения: Материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии, Санкт-Петербург, 31 марта – 01 апреля 2022 года*. Москва: ГеоИнфо; 2022. С. 326–332. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48425502>
9. Jia-Cai Liu, Guo-Hui Lei, Xu-Dong Wang. One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2015;33(4):337–347. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.877109>
10. Xiao-mi Li, Qian-qing Zhang, Shan-wei Liu. Semianalytical solution for long-term settlement of a single pile embedded in fractional derivative viscoelastic soils. *International Journal of Geomechanics*. 2021;21(2):04020246. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001906](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001906)
11. Демин В. А. *Экспериментальное и теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния двухфазной вязкоупругой среды: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Санкт-Петербург; 2005. 30 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002930116?page=1&rotate=0&theme=white>
12. Твердохлеб С. А., Воронцов В. В. Результаты лабораторного исследования консолидации слабого водонасыщенного глинистого макрообразца удаленного от дневной поверхности. В сб.: *Актуальные проблемы архитектуры, строительства, экологии и энергосбережения в условиях Западной Сибири: Сборник материалов международной научно-практической конференции: в 2 томах. Том 1. Тюмень, 23 апреля 2015 года*. Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет; 2015. С. 64–72.
13. Воронцов В. В., Набоков А. В., Овчинников В. П., Твердохлеб С. А. Результаты компрессионного сжатия слабых водонасыщенных глинистых макрообразцов с применением «грунтового замка». *Научно-технический вестник Поволжья*. 2015;(1):60–65. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23136613>
14. Мальцев Л. Е., Бай В. Ф., Мальцева Т. В. *Кинематическая модель грунта и биоматериалов*. Санкт-Петербург: Стройиздат; 2002. 336 с.
15. Бай В. Ф., Набоков А. В., Воронцов В. В., Краев А. Н. Экспериментальное исследование нагруженного основания из водонасыщенного армированного суглинка. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2008;(1):102–104.
16. Мальцева Т. В., Парфенова Т. В. Влияние точек совпадений в методе ломаных на обусловленность матрицы. *Известия высших учебных заведений. Нефть и газ*. 2002;(3):101–106. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897092>
17. Крижанивская Т. В., Воронцов В. В., Тайех Б. А. Расчет вязкоупругого водонасыщенного глинистого основания при действии полосовой нагрузки. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(2):50-63:<https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-50-63>.
18. Крижанивская Т. В., Бай В. Ф., Мальцева Т. В., Коркишко А. Н. *Расчет водонасыщенных грунтовых оснований*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2020. 141 с. ISBN 978-5-9961-2344-5.

### References

1. Drucker D. C., Gibson R. E., Henkel D. Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity. *American Society of Civil Engineers*. 1957;122(1). <https://doi.org/10.1061/taceat.0007430>
2. Ter-Martirosyan Z. G. *Prediction of mechanical processes in multiphase soil masses*. Moscow: Nedra, 1986. (In Russ.)
3. Ter-Martirosyan Z. G., Ter-Martirosyan A. Z., Luzin I. N. The stress-strain state of a finite rectangular domain under a uniformly distributed strip load. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2018;55(2):68–75. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9505-5>
4. Ter-Martirosyan Z. G., Filippov K. A. A solution to the problem of pile settlement caused by vertical static loading with consideration to plastic properties of the foundation soil. *Vestnik MGSU*. 2022;17(7):871–881. (In Russ.) <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2022.7.871-881>
5. Shirokov V. N., Zabolotskaya A. A. Experience in determining the deformation characteristics of clay soils under conditions of odometric compression with static loading and in the stress relaxation mode. *Bulletin of Lomonosov Moscow State University in Dushanbe*. 2021;(3):115–127. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=47473814>
6. Zhakulin A. S., Zhakulina A. A., Zhusupbekov A. Z., Nefedov V. N., Tungatarov A. M., Popov N. I. Prediction of the settlement of foundations by an elastic-plastic model of clay soils. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2022;59(3):224–228. <https://doi.org/10.1007/s11204-022-09805-8>
7. Abelev M. Yu., Averin I. V., Abelev K. M., Chunyuk D. Yu., Almazov A. A. *Construction on weak, saturated clay soils*. Moscow: Izdatel'stvo ASV, 2023. ISBN 978-5-4323-0483-4. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=54107159>
8. Shashkin A. G., Shashkin K. G., Vasenin V. A. On the predictive capability of soil mechanics models. In: *Sergeevskie chteniya. Fundamental'nye i prikladnye voprosy sovremennoego gruntovedeniya: Materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geoekologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii*, Sankt-Peterburg, 31 March – 01 April, 2022. Moscow: Geoinfo, 2022. P. 326–332. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48425502>
9. Jia-Cai Liu, Guo-Hui Lei, Xu-Dong Wang. One-dimensional consolidation of visco-elastic marine clay under depth-varying and time-dependent load. *Marine Georesources & Geotechnology*. 2015;33(4):337–347. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2013.877109>
10. Xiao-mi Li, Qian-qing Zhang, Shan-wei Liu. Semianalytical solution for long-term settlement of a single pile embedded in fractional derivative viscoelastic soils. *International Journal of Geomechanics*. 2021;21(2):0402046. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)GM.1943-5622.0001906](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GM.1943-5622.0001906)
11. Demin V. A. *Experimental and theoretical study of the stress-strain state of a two-phase viscoelastic medium: Dissertation abstract for the candidate of technical sciences degree*. St. Petersburg; 2005. 30 p. (In Russ.) URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01002930116?page=1&rotate=0&theme=white>
12. Tverdokhleb S. A., Vorontsov V. V. Laboratory test results on the consolidation of a soft, water-saturated clay macro-sample from a significant depth. In: *Aktual'nye problemy arkhitektury, stroitel'stva, ekologii i energosberezheniya v usloviyakh Zapadnoy Sibiri: Sbornik materialov mezdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii: in 2 vol. Vol. 1. Tyumen, 23 April, 2015*. Tyumen: Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; 2015. P. 64–72. (In Russ.)
13. Vorontsov V. V., Nabokov A. V., Ovchinnikov V. P., Tverdokhleb S. A. Results of compression pressure weak water-saturated clay macro sample using the "ground lock". *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2015;(1):60–65. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23136613>
14. Maltsev L. E., Bai V. F., Maltseva T. V. *Kinematic model of soil and biomaterials*. Saint Petersburg: Stroyizdat; 2002. (In Russ.)
15. Bai V. F., Nabokov A. V., Vorontsov V. V., Kraev A. N. Experimental study of the stressed foundation from the water saturated reinforced loamy soil. *Oil and gas studies*. 2008;(1):102–104.
16. Maltseva T. V., Parfenova T. V. Influence of coincidence points in the method of lines on matrix conditioning. *Oil and Gas Studies*. 2002;(3):101–106. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22897092>
17. Krizhanivskaya T. V., Vorontsov V. V., Tayeh B. A. Analysis of a viscoelastic water-saturated clay foundation subjected to a strip load. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(2):50-63. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-2-50-63>
18. Krizhanivskaya T. V., Bai V. F., Maltseva T. V., Korkishko A. N. *Calculation of water-saturated soil foundations*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2020. 141 p. ISBN 978-5-9961-2344-5. (In Russ.)



#### Информация об авторах

**Крижанивская Татьяна Валерьевна**, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, krizhanivskajatv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5433-2405>

**Воронцов Вячеслав Викторович**, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, vorontsovvv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0141-7452>

**Тайех Бассам А.**, PhD, профессор, Исламский университет Газы, Газа, Палестина, <https://orcid.org/0000-0002-2941-3402>

**Куличенко Фаина Сергеевна**, магистрант, Российский университет дружбы народов им. Патрика Лумумбы, Москва, Российская Федерация, gardenfaina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5091-1262>

#### Information about the authors

**Tatiana V. Krizhanivskaya**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, krizhanivskajatv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-5433-2405>

**Viacheslav V. Vorontsov**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Building Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, vorontsovvv@tyuiu.ru

**Bassam A. Tayeh**, PhD, Professor, Islamic University of Gaza, Gaza, Palestine, <https://orcid.org/0000-0002-2941-3402>

**Faina S. Kulichenko**, Graduate Student, Peoples' Friendship University of Russia named after Patrice Lumumba, Moscow, Russian Federation, gardenfaina@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0001-5091-1262>

Получена 12 августа 2025 г., одобрена 26 ноября 2025 г., принятa к публикации 08 декабря 2025 г.

Received 12 August 2025, Approved 26 November 2025, Accepted for publication 08 December 2025



## Оптимизация структуры парка грузовых автомобилей для обслуживания магистральных газопроводов

Н. С. Захаров, Н. О. Сапоженков , В. А. Ракитин

Тюменский индустриальный университет

Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

[sapozhenkovno@tyuiu.ru](mailto:sapozhenkovno@tyuiu.ru)



**Аннотация.** На основе апробированных методов обработки статистических данных проанализирован опыт эксплуатации газомоторной техники на примере газодизельных модификаций седельных тягачей КАМАЗ с учетом фактической надежности, особенностей конструкции топливной аппаратуры и показателей грузоподъемности. Анализ частоты выполнения транспортных заданий по перевозке грузов проводился на основе путевых листов и утвержденных графиков строительно-монтажных работ по содержанию объектов газотранспортной инфраструктуры с оценкой затрат на техническое обслуживание и формализацией критерии оптимизации транспортных маршрутов. В ходе сравнения седельных тягачей с традиционными и газомоторными двигателями установлены новые закономерности формирования себестоимости перевозок и разработана многокритериальная система оценки эффективности, учитывающая экономические, эксплуатационные и логистические параметры. Для практического использования полученных результатов предложена модель на смешанных эффектах с функцией единичного скачка, применение которой позволяет снизить себестоимость транспортных работ на 18 % за счет повышения коэффициента использования парка и оптимизации логистических маршрутов доставки грузов на объектах газотранспортной системы.

**Ключевые слова:** себестоимость перевозок, эффективность транспортного обеспечения, топливная аппаратура, АГНКС, оптимизация маршрутов

**Благодарности.** Исследование выполнено за счет средств гранта НО «Благотворительный фонд «ЛУКОЙЛ».

**Для цитирования:** Захаров Н. С., Сапоженков Н. О., Ракитин В. А. Оптимизация структуры парка грузовых автомобилей для обслуживания магистральных газопроводов. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):86–99. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-86-99> EDN: QVRJKP

## Truck fleet structure optimization for main gas pipelines servicing

Nikolay S. Zakharov, Nikolay O. Sapozhenkov , Vladimir A. Rakitin  
Industrial University of Tyumen  
Tyumen, 38 Volodarskogo St., 625000, Russian Federation

[sapozhenkovno@tyuiu.ru](mailto:sapozhenkovno@tyuiu.ru)

**Abstract.** Based on proven statistical data, the experience of operating gas-powered vehicles was analyzed using the example of gas-diesel modifications of KAMAZ truck tractors, taking into account actual reliability, design features of the fuel system, and load capacity. The analysis of the cargo transportation tasks frequency was conducted based on waybills and approved schedules for construction and installation work for the maintenance of gas transportation infrastructure facilities. It also included an assessment of maintenance costs and formalization of criteria for optimizing transport routes. During the comparative analysis of tractor trucks with conventional and gas-powered engines, new patterns of transportation cost formation were established and a multi-criteria efficiency assessment system was developed. This system takes into account economic, operational, and logistical parameters. For practical application of the obtained results, a mixed-effects model with a single-step function was proposed. The use of this model makes it possible to reduce the transportation costs by 18% by increasing the fleet utilization rate and optimizing logistics routes for cargo delivery at the facilities of the gas transmission system.

**Keywords:** transportation costs, efficiency of transport support, fuel equipment, CNG stations, route optimization

**Acknowledgements.** The research was supported by a grant from the LUKOIL Charitable Fund.

**For citation:** Zakharov N. S., Sapozhenkov N. O., Rakitin V. A. Truck fleet structure optimization for main gas pipelines servicing. *Architecture, Construction, Transport.* 2025;5(4):86–99. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-86-99>

## 1. Введение / Introduction

Применение расширенного перечня транспортных и транспортно-технологических машин в области добычи, переработки и транспортировки газа обусловлено особенностями производственно-технологических процессов в этой сфере [1, 2]. В решении транспортно-логистических задач, осуществляемых на значительном удалении от основных производственно-технических комплексов, особую значимость имеют факторы климатической вариативности и специфика маршрутной сети, характеризующейся преимущественным отсутствием твердых дорожных покрытий [1].

Данные условия эксплуатации предопределяют преобладание в структуре транспортного и специализированного технологического парка грузовых автомобилей широкого спектра функционального применения. Формирование структуры автотранспортного парка грузовых машин осуществляется с учетом комплексного анализа габаритно-массовых характеристик транспортируемых грузов, специфических требований к процессу перевозки и дорожных условий. При оценке конкурентоспособности транспортных средств ключевыми параметрами выступают показатели безопасности эксплуатации, экологической эффективности, эксплуатационной надежности и топливной экономичности.

Выбор грузового автотранспорта производится по нескольким критериям: показателю грузоподъемности, функциональной специализации, конструктивным особенностям и типу используемого топлива [3, 4]. Актуальная методологическая парадигма формирования автотранспортного парка газодобывающих предприятий основана на принципе комплексного обеспечения всего спектра производственных задач: от пассажирской и грузовой логистики до реализации узкоспециализированных технических операций, поэтому учитывает климатические факторы, параметры дорожно-транспортной инфраструктуры и организационно-эксплуатационные показатели [5, 6]. Это позволяет обеспечивать непрерывность транспортного сервиса в соответствии с отраслевыми нормативными требованиями и техническими регламентами по переработке нефтегазоконденсатных ресурсов.

Вместе с тем экономическая эффективность перехода на газомоторное топливо определяется совокупностью факторов, включающих инвестиционные затраты на монтаж специализированного оборудования, увеличение массы транспортного средства и модификацию рабочих параметров двигателей внутреннего сгорания [3, 4, 7–10]. При малой интенсивности эксплуатации данные факторы могут привести к экономически нецелесообразному росту эксплуатационных расходов, обусловленному превышением периода окупаемости над средним сроком владения транспортным средством и влиянием технологических изменений при производстве новой техники на показатели эксплуатации парков по критериям безотказности, обеспеченности ресурсами и трудоемкости технического обслуживания [11–13]. Поэтому управление парком газомоторной техники в условиях ужесточения требований к обеспечению безопасности эксплуатации и целевых показателей развития инфраструктуры для заправки и хранения газа с учетом расположения автомобильных газонаполнительных компрессорных станций (АГНКС) является актуальной проблемой. Для ее решения необходимо проведение дополнительных исследований в контексте разработки новых походов к формированию логистических маршрутов с учетом фактической надежности, эксплуатационных расходов и специфики выполнения транспортных работ.

Таким образом, целью исследования являлось повышение эффективности эксплуатации парка газомоторных седельных тягачей на основе оптимизации маршрутов перевозок в зависимости от срока службы и частоты расположения АГНКС. В качестве объекта исследования выступала комплексная система транспортного обеспечения работ по обслуживанию магистральных газопроводов, а предметом – структурная организация грузового автопарка. Для достижения поставленной цели потребовалось решить ряд задач, включая выявление взаимосвязей между ключевыми факторами, расчет экономических показателей и разработку математических моделей, что позволило снизить затраты на организацию перевозок и сформулировать практические рекомендации по оптимизации структуры парка грузовых автомобилей для транспортного обеспечения технологических процессов по обслуживанию магистральных газопроводов. Научная новизна работы заключается в разработке математической модели на смешанных эффектах для оптимизации структуры парка грузовых автомобилей, которая, в отличие от известных подходов, комплексно учитывает динамику изменения эксплуатационных затрат в зависимости от срока службы и логистических ограничений, связанных с неравномерностью расположения газозаправочной инфраструктуры.

Анализ опыта эксплуатации и ранее выполненных исследований показал, что вопросам изучения эффективности эксплуатации транспортных и транспортно-технологических машин посвящено много работ отечественных и зарубежных ученых [3, 4, 6, 7, 10–19]. Установлены закономерности формирования технического состояния по показателям надежности [12], потока требований к ресурсам [12, 13, 15], оптимального срока службы [11], стоимости [9, 20] и других критериях, применение которых в составе разработанных методик и методологий [3, 4, 10] повышает эффективность транспортного обеспечения технологических процессов с учетом особенностей выполнения транспортной работы, технических характеристик и условий эксплуатации [12] в составе парков транспортных и транспортно-технологических машин. Для совершенствования топливных систем современных грузовых автомобилей характерно регулярное изменение конструкции составных элементов, свойств материалов и алгоритмов управления [13, 15, 16], в результате чего изменяются параметры рабочих процессов, повышается производительность, улучшаются показатели топливной экономичности [17, 18, 20]. Прогрессирующий рост стоимости традиционных энергоносителей является причиной трансформации приоритетов в области оптимизации структуры автопарков, стимулирует переход на экономически более эффективные газовые виды топлива. Особую актуальность данная тенденция приобретает в контексте промышленных предприятий, где транспортные средства эксплуатируются в интенсивном многосменном режиме, обеспечивая максимально быструю окупаемость затрат

на переоборудование. Исследователи отмечают [5, 6, 10, 13, 16], что вариация условий и интенсивности эксплуатации приводит к деградации работоспособности технологического транспорта, что негативно отражается на экономической эффективности транспортных операций вследствие роста числа отказов, увеличения затрат на техническое обслуживание, приобретение комплектующих и необходимости содержания дополнительных резервных транспортных единиц для компенсации технологических простоев, обусловленных внеплановыми простоями. Поэтому оценка целесообразности использования газомоторной техники должна учитывать динамику изменения показателей эксплуатации в течение установленных сроков службы<sup>1</sup>. В Концепции развития рынка газомоторного топлива в РФ на период до 2035 года<sup>2</sup> обозначена необходимость проведения научно-исследовательских работ и последующего внедрения эффективных технологических решений для использования газомоторного топлива. Оптимизация осуществляется на основе результатов анализа данных ГЛОНАСС-мониторинга с последующим формированием датасетов по интенсивности эксплуатации с привязкой к геопозиционированию по критериям расположения газозаправочных станций, поэтому определение параметров математических моделей для формирования маршрутов на основе алгоритмов оптимизации является актуальным направлением совершенствования методов управления корпоративными автопарками.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Для предприятий по добыче, переработке и транспортировке газа вопросы, связанные с использованием газомоторного топлива, имеют стратегическое значение. По официальным данным, в дочерних обществах ПАО «Газпром» доля машин на газомоторном топливе превышает 63 % и составляет 23.5 тыс. ед.<sup>3</sup>, а к концу 2025 г. концерн ставит цель стать обладателем самого крупного в России парка техники на природном газе<sup>4</sup>, что обеспечивает репрезентативную базу для сопоставления дизельных и газодизельных комплектаций с учетом особенностей климата в северных регионах, фактических наработок на отказ и удаленности АГНКС.

В качестве методологии исследований выбрана концепция формирования качества автомобилей [1, 2]. Системный подход в ее основе предполагает рассмотрение структуры автопарка в виде системы, взаимосвязи между элементами которой определяются функциональными зависимостями и моделями, отражающими действительные закономерности формирования численных значений показателей воздействия исследуемых факторов. Для этого составляется схема системы формирования транспортных затрат при организации перевозки грузов с использованием седельных тягачей, определяются связи между элементами, вход, выход и характер взаимодействия с внешней средой.

В качестве исходных данных для оценки надежности использовались базы данных предприятий сервиса технологического транспорта, корпоративные отчеты по эксплуатации в транспортных

<sup>1</sup> Лобода В. Свыше 70 % автотранспортных средств в РФ имеют возраст от 10 лет и старше. URL: <https://www.autostat.ru/news/58195/> (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>2</sup> Концепция развития рынка газомоторного топлива в Российской Федерации до 2035 года: Распоряжение Правительства Российской Федерации от 29.08.2025 № 2366-р. URL: <http://publication.pravo.gov.ru/document/0001202509080022?index=2>

<sup>3</sup> Отчет ПАО «Газпром» за 2024 год. URL: <https://www.gazprom.ru/investors/disclosure/reports/2024/> (дата обращения: 01.10.2025).

<sup>4</sup> ПМЭФ-2025: «Газпром» сформировал крупнейший в России парк экологичной техники для перевозки сжиженных газов. URL: <https://www.gazprom.ru/press/news/2025/june/article581809/> (дата обращения: 01.10.2025).

подразделениях для обслуживания магистральных газопроводов за 2019–2024 гг.<sup>5</sup>, публикации о сравнении газодизельных и дизельных автомобилей с учетом сезонного влияния на поток отказов и особенностей эксплуатации газобаллонных автомобилей [3, 5, 11, 15, 17–19], исследования надежности двухтопливных модификаций [7–9], практические обзоры по использованию КАМАЗ [3, 13] и требования заводов-изготовителей по применению ГБО<sup>6</sup>. Удельные эксплуатационные затраты в модели включают в себя расходы на проведение регламентных работ в соответствии с действующей на предприятиях системой планово-предупредительных ремонтов, поэтому график ТО и нормативы трудоемкости заложены в расчет стоимости текущего ремонта для каждой группы автомобилей.

В процессе структурной оптимизации транспортного парка в зависимости от специфики решаемых задач дифференцируются три базовых системных состояния:

- существующая конфигурация парка обеспечивает полное покрытие транспортных потребностей, необходима оптимизация схемы использования наличного подвижного состава;
- текущая структура парка обеспечивает частичное покрытие необходимого объема перевозок, требуется оптимальное наращивание транспортного потенциала;
- отсутствие собственных транспортных мощностей при известных характеристиках доступного подвижного состава, что вызывает необходимость формализации параметров маршрутов для привлечения транспортных средств на аутсорсинговой основе.

Фундаментальными исходными параметрами при проведении структурной оптимизации автомобильного парка выступают:

- прогнозируемые транспортные объемы;
- спецификация транспортируемых грузов;
- технические характеристики подвижного состава.

Структура парка является оптимальной в случае, когда суммарные затраты имеют минимальное значение, поэтому в качестве показателя эффективности функционирования может быть использован коэффициент себестоимости транспортной работы  $K_c$ :

$$K_c = (\sum V_j p_j - \sum C_i) / \sum C_i,$$

где  $V_j$  – объем  $j$ -го транспортной работы;

$p_j$  – стоимость  $j$ -го работ;

$C_i$  – затраты на эксплуатацию  $i$ -й группы автомобилей.

Из уравнения следует, что при фиксированных объемах и стоимости транспортных работ затраты на эксплуатацию автомобилей существенно влияют на эффективность перевозок, поэтому оценка численных значений показателей эксплуатации осуществлялась на основе пассивного эксперимента, в ходе которого по методике [2] обрабатывались данные по наработкам на отказ, условиям и интенсивности эксплуатации грузовых автомобилей в подразделениях технологического транспорта обслуживающих предприятий единой газотранспортной системы. Сравнение осуществлялось по стандартным показателям надежности автопарков:

- интенсивность отказов, п/км;
- средняя наработка на отказ, км;
- среднее время восстановления, ч;

<sup>5</sup> См. сноска 3.

<sup>6</sup> Газомоторная техника КАМАЗ. URL: <https://www.truck-holding.ru/gazomotornaya-technika-kamaz/> (дата обращения: 01.10.2025).

- коэффициент технической готовности;
- структура отказов по подсистемам (топливная аппаратура, газобаллонное оборудование высокого давления, арматура/магистрали, электронные блоки управления подачей газа, дизельные форсунки и ТНВД, охлаждение и пр.).

Формирование модели себестоимости перевозок, адекватно отражающей влияние пространственного распределения заправочной инфраструктуры, представляет собой методологическую задачу по оценке динамики изменения затрат на топливное обеспечение и обслуживание парка по мере приращения наработки. Использование детерминированных и стохастических зависимостей [6] эффективно в условиях стабильной и однородной эксплуатационной среды, однако при анализе парка на газомоторном топливе на первый план выходит принципиально иной фактор – дискретная и зачастую неравномерно распределенная сеть АГНКС, которая вносит в систему ярко выраженную нелинейность и не всегда точно описывается традиционными линейными или степенными моделями. Ключевая сложность моделирования заключается в необходимости корректного описания переходной области между двумя асимптотическими режимами функционирования: экономически эффективным газодизельным режимом при наличии доступной инфраструктуры и вынужденным переходом на дизельное топливо при ее отсутствии.

Кусочно-линейная аппроксимация фиксирует наличие порога, но не отражает операционной реальности, в которой решение о смене топливного режима определяется не только структурой маршрута, но и остатком топлива, графиком работы станций и изменением параметров рабочих процессов техники по мере приращения наработки. Машинное обучение требует большого объема данных и не всегда позволяет экстраполировать результаты за пределы условий обучения из-за структуры «черного ящика» при имитационном моделировании и дальнейшем масштабировании. В этом контексте применение модели с функцией единичного скачка представляется методологически обоснованным компромиссом, поскольку, с одной стороны, сохраняет аналитическую форму, удобную для последующего анализа чувствительности и интеграции в оптимизационные алгоритмы, что соответствует требованию практической применимости, а с другой – математически воспроизводит саму суть исследуемого процесса, выраженную через плавное, а не моментальное изменение доминирующего вклада в себестоимость при изменении соотношения «пробег – расстояние до АГНКС». Важным достоинством такого подхода является его сочетаемость с устоявшимся нормативным аппаратом. Модель не заменяет, а содержательно дополняет классические компоненты – нормативы расхода топлива, функции затрат на ремонт, амортизационные отчисления.

Таким образом, для воспроизведения полученных результатов были рассчитаны показатели влияния наиболее значимых факторов, установлен закон распределения отказов газомоторных и дизельных седельных тягачей и определены параметры математической модели на смешанных эффектах с функцией единичного скачка, применение которой позволяет осуществлять имитационное моделирование состояний транспортной системы в зависимости от срока службы и частоты расположения АГНКС на протяжении маршрутов следования для определения себестоимости перевозок.

### **3. Результаты и обсуждение / Results and discussion**

Ключевым преимуществом газомоторного топлива выступает его сравнительно низкая стоимость с умеренной среднегодовой динамикой индексации стоимости кубометра газа относительно альтернативных видов топлива.

В современной практике эксплуатации грузового автотранспорта природный газ (метан  $\text{CH}_4$ ) применяется в двух агрегатных состояниях при различных параметрах давления:

- компримированном (КПГ/CNG): характеризуется сжатием газа до давления 200 бар, что обеспечивает уменьшение объема в 200 раз;

- сжиженном (СПГ/LNG): достигается путем технологической переработки с охлаждением до температуры  $-162^{\circ}\text{C}$  и последующим хранением в специализированных криогенных емкостях под давлением до 16 бар, что обеспечивает сокращение объема в 600 раз.

Технологическая дифференциация позволяет оптимизировать выбор типа газомоторного топлива в зависимости от специфических требований конкретного транспортного предприятия и особенностей эксплуатации автотранспортных средств. В целях достижения оптимального запаса хода газомоторной техники возникает необходимость применения дополнительного комплекса топливных баллонов для обеспечения автономности работы, сопоставимой с дизельными модификациями, что одновременно приводит к снижению полезной грузоподъемности и транспортного объема в диапазоне 8–15 %.

Данный аспект зачастую не указывается производителями при формировании коммерческих предложений потенциальным заказчикам, так как для транспортных операций, не предполагающих полного использования номинальной грузоподъемности, указанное ограничение не оказывает существенного влияния на эффективность эксплуатации. С учетом таких ограничений газомоторная техника демонстрирует значительные преимущества по ключевым экономическим показателям, включая себестоимость тонно-километра и период окупаемости, снижение которого обусловлено развитием государственных программ субсидирования, компенсирующих затраты на установку специализированного оборудования и обслуживание топливной системы. Дополнительную инвестиционную привлекательность создают низкая стоимость газового топлива, возможности расширенной комплектации и увеличения запаса хода путем монтажа дополнительных топливных емкостей. Конструктивные особенности газомоторных тягачей принципиально отличаются от традиционных дизельных аналогов наличием специализированной системы хранения метана, представленной комплексом баллонов высокого давления либо криогенными резервуарами. Однако независимо от применяемого типа газового топлива (КПГ или СПГ) и пропорций его использования совместно с дизельным топливом в двухтопливных модификациях базовая конструкция двигателя внутреннего сгорания остается неизменной.

Анализ показал, что надежность дизельных тягачей подтверждается увеличенным пробегом до капитального ремонта, высоким коэффициентом технической готовности с меньшим количеством отказов и временем восстановления (таблица 1).

Газодизельные тягачи уступают по надежности, что выражается в росте отказов на 20 % и увеличении простоев почти на 37 %. Затраты на техническое обслуживание газомоторных и дизельных комплектаций в составе парков техники транспортных подразделений газодобывающих производств отличаются в основном из-за стоимости устранения отказов топливной системы, так как

Таблица 1 Показатели надежности седельных тягачей с дизельными и газодизельными топливными системами

Table 1. Reliability indicators for truck tractors with diesel and gas-diesel fuel systems

Показатель	Дизельные тягачи	Газодизельные тягачи	Разница, %
Средний пробег до капитального ремонта, тыс. км	650	580	-10.8
Среднегодовой коэффициент технической готовности, %	0.92	0.88	-4.3
Удельное количество отказов на 10 тыс. км пробега, ед.	0.35	0.42	20
Среднее время восстановления после отказа, ч	6.5	7.4	13.8
Доля простоев в ремонте от календарного времени эксплуатации, %	5.2	7.1	36.5
Удельные эксплуатационные затраты на 1 км пробега, руб.	64	58	-9.4
Удельная экономия по топливным затратам, %	-	15	15

работа газобаллонного оборудования осуществляется при высоком давлении 200–260 бар, для чего используются дополнительные рукава высокого давления, запорная арматура, мультиклапаны, редукторы испарения, регуляторы давления и рампы дозирования, чувствительность которых к температуре и качеству газа по наличию влаги, масляного тумана и механических примесей повышает риски зависания клапанов из-за обмерзания, нарушения целостности уплотнений, роста топливных коррекций и повышения вибрационной нагрузки на элементы крепления баллонов и газовой арматуры, поэтому использование большего количества составных элементов с необходимостью применения расширенного перечня технических воздействий по настройке и регулировке способствует росту удельных затрат по мере увеличения срока службы. Проверка по критерию Пирсона показала, что распределение наработок на отказ элементов топливных систем дизельных и газодизельных автомобилей с коэффициентами вариации 0.39 и 0.48 соответствует закону Вейбулла при уровне значимости 0.05 (рис. 1).

Вместе с тем параметры сгорания метана способствуют снижению нагарообразования и частично улучшают состояние масла, что косвенно поддерживает ресурс цилиндроворшневой группы и турбокомпрессора при правильной настройке дозирования. Это подтверждается рядом инженерных отчетов и программ [3, 9], что с учетом разницы в топливе при эксплуатации газодизельных тягачей обеспечивает снижение себестоимости пробега за счет экономии топлива на 15 % и частично компенсирует рост затрат на поддержание работоспособности, поэтому в условиях удаленных районов и высокой интенсивности эксплуатации дизельные комплектации остаются более предпочтительными, в то время как газодизельные целесообразны на маршрутах с регулярным доступом к инфраструктуре СПГ/КПГ с акцентом на топливную экономичность. Топливные резервуары для СПГ характеризуются более выгодными технико-экономическими параметрами по сравнению с системами хранения КПГ в части вместимости, массогабаритных показателей и стоимостных характеристик. Однако практическая целесообразность применения конкретного типа газомоторного топлива в значительной степени определяется доступностью соответствующей заправочной инфраструктуры. Это обусловлено существенными различиями в технологическом оснащении АГНКС, так как для КПГ требуется специализированное компрессорное оборудование, обеспечивающее превышение рабочего давления по сравнению с СПГ в 10 и более раз, а для СПГ необходимы криогенные заправочные комплексы с дорогостоящими системами регазификации и специфическими заправочными модулями. В связи с этим АГНКС редко интегрируют обе технологии из-за значительных различий в процессах производства, хранения и транспортировки различных типов газового топлива. Инфраструктура АГНКС характеризуется неравномерным территориальным распределением с преимущественной концентрацией в центральных регионах Российской Федерации. При этом наблюдается существенная дифференциация в доступности для транспортных средств, использующих КПГ и СПГ. Данная особенность создает определенные ограничения для эффективной эксплуатации газомоторной техники, особенно при осуществлении грузоперевозок на дальние дистанции по маршрутам с низкой транспортной активностью и в регионах с недостаточным уровнем газификации.

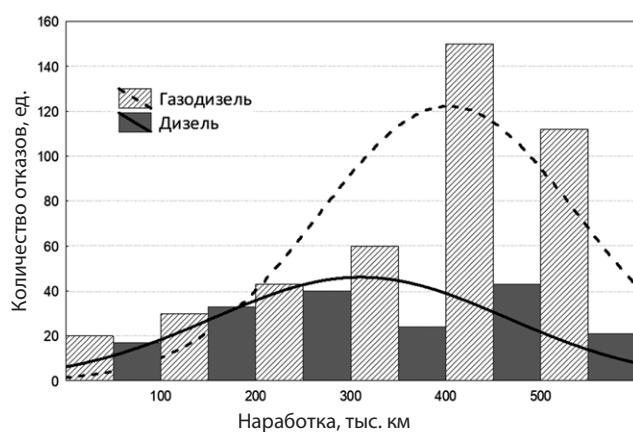


Рис. 1. Сравнение наработок на отказ седельных тягачей КАМАЗ с разными топливными системами (график составлен авторами)

Fig. 1. Comparison of the failure rate of KAMAZ truck tractors with different fuel systems (graph constructed by the authors)

Для оценки целесообразности применения стандартных газодизельных комплектаций автомобилей в условиях, когда удаленность между заправочными станциями превышает средний запас хода на газомоторном топливе 500 км, задача сводится к корректному математическому описанию плавного перехода между этими режимами, а не простого усреднения. В таких случаях может быть использована модель на смешанных эффектах с функцией единичного скачка, применение которой позволяет оценить величину изменения топливных затрат при переходе в дизельный режим на участках с недостаточной частотой расположения АГНКС:

$$C_{km}(T, L) = \frac{y_1(T) \cdot L}{1 + e^{-i2k(S-L)}} + \frac{y_2(T) \cdot L + y_1(T) \cdot S - y_2(T) \cdot S}{1 + e^{-i2k(L-S)}},$$

где  $C$  – себестоимость перевозки, руб./т-км;

$T$  – срок службы, лет;

$L$  – пробег, км;

$y_{1,2}$  – модель изменения себестоимости транспортной работы для газодизельной и дизельной комплектации тягача, руб./т-км;

$S$  – расстояние между АГНКС, км;

$K$  – поправочный коэффициент.

Уравнение показывает, что при переходе на газомоторное топливо возникает принципиально новая нелинейная зависимость, где себестоимость тонно-километра становится функцией не только пробега и срока службы, но и соотношения между протяженностью маршрута  $L$  и расстоянием до ближайшей АГНКС  $S$ . Система ведет себя по-разному в двух асимптотических режимах: при избытке инфраструктуры  $S < L$  и при ее дефиците  $S > L$ . Коэффициент  $K$  при этом выполняет роль калибруемой константы, которая может быть оценена на основе данных телематического мониторинга ГЛОНАСС и отражает фактическую степень интенсивности логистического порога в конкретных региональных условиях. Это позволяет имитировать изменение себестоимости перевозок в зависимости от расстояния между АГНКС  $S$  и пробега  $L$  для планирования точек заправки и распределения участков маршрута между топливными режимами для минимизации суммарной стоимости тонно-километра. Оптимизация маршрутов позволяет повысить коэффициент использования парка за счет снижения количества простоев, связанных с ожиданием заправки или ремонтом при рациональном распределении техники между задачами.

Структура модели  $y_i(T)$  отражает затраты на топливо и расходы на обеспечение работоспособности, состоящие из амортизационных отчислений, стоимости текущего ремонта и операционных затрат:

$$y_i(T) = C_j^{Fuel} + \frac{C_j^a}{T} + C_R(T) + C_{op},$$

где  $C_j^{Fuel}$  – топливные затраты, руб./т-км;

$C_j^a$  – амортизационные отчисления, руб./т-км;

$C_R(T)$  – модель стоимости текущего ремонта, руб./т-км;

$C_{op}$  – постоянные затраты для операционной деятельности (ТО, шины, зарплата водителя и пр.), руб./т-км.

Значения параметров зависят от конкретной стратегии обновления парка, графика ТО, условий лизинга, средней загрузки и доли порожних пробегов. Для автопоездов с большей фактической полезной нагрузкой себестоимость на тонно-километр еще ниже. Коэффициент  $K$  корректируется по действующей карте и зависит от плотности расположения газозаправочной инфраструктуры, поэтому

му чем больше АГНКС на маршруте, тем сильнее сглажен переход в дизельный режим и меньше значения  $K$ .

В качестве исходных данных в расчетах использовалась информация о стоимости дизельного топлива – 71.49 руб./л (среднее по РФ на 11 августа 2025 г.) в сравнении с КПГ (CNG) на АГНКС «Газпром» 27.06 руб./ $m^3$  (с 1 августа 2025 г.; динамика за месяц – 0.83 руб.). Расчетные нормы расхода для дизельных комплектаций КАМАЗ-5490 при движении по шоссе на скорости 80–85 км/ч составляют 29–30 л/100 км, в то время как при двойном питании на газодизельных комплектациях типовой режим подмешивания, близкий к практикам dual-fuel, составляет 15.5 л дизельного топлива и 14  $m^3$  КПГ на 100 км либо 40 л/100 км при движении исключительно на КПГ. Полезная нагрузка для обеих комплектаций составляет 20 т, но у газодизельных версий фактические значения ниже на 8–15 %, что обусловлено дополнительной массой топливного газового оборудования, а именно количеством, емкостью и конструкцией баллонов. Значения поправочного коэффициента  $K$  в расчетах принимаются 0.02, что отражает среднюю плотность расположения АГНКС на участке следования (рис. 2).

Предложенная модель является закономерным развитием классических методов технико-экономического анализа применительно к новому классу задач, обусловленных технологическим переходом на альтернативные виды топлива. Кроме того, она позволяет преодолеть ограничения традиционных моделей в описании систем с пространственно-дискретными ресурсами как инструмент для обоснования управлеченческих решений по оптимизации структуры парка в условиях неоднородной инфраструктурной обеспеченности и комплексной оценки себестоимости транспортных операций с учетом динамики эксплуатационных затрат. В частности, модель учитывает прогрессирующий рост расходов на устранение технических неисправностей и экономические потери, связанные с вынужденными простоями, которые увеличиваются пропорционально сроку эксплуатации седельных тягачей. Оценка адекватности полученной модели осуществлялась по дисперсионному отношению Фишера и средней ошибке аппроксимации на основе данных путевых листов, заказ-нарядов на ТО и фактической бухгалтерской отчетности, для исследуемых процессов значения вероятности составили 0.95 и 12 % соответственно. В ходе моделирования были получены значимые данные, демонстрирующие экономическую эффективность использования газодизельных транспортных средств при соблюдении определенных эксплуатационных условий. Максимальная рентабельность достигается на маршрутах, где расстояние между доступными АГНКС не превышает 500 км, а степень загрузки транспортного средства, выраженная через коэффициент использования грузоподъемности, находится в пределах от 0.73 до 0.85. При соблюдении этих параметров наблюдается существенное снижение транспортных издержек – экономический эффект выражается в уменьшении стоимости перевозки 1 т-км на 18 %. Такое сокращение затрат обеспечивается благодаря оптимальному балансу между эксплуатационными характеристиками газодизельных систем и логистической доступностью заправочной инфраструктуры. Если стоимость КПГ опускается до 25–26 руб./ $m^3$  по акциям EcoGas или региональным программам, экономия растет на 2–3 % по топливной части. При росте стоимости дизельного топлива выше 72–75 руб./л себестоимость дорожает линейно и при шаге 1 руб./л добавляет 0.0043 руб./т-км.



Рис. 2. Зависимость стоимости эксплуатации газодизельных седельных тягачей от срока службы и частоты расположения АГНКС (график составлен авторами)

Fig. 2. Dependence of truck tractors operating cost on the service life and frequency of the CNG stations location (graph constructed by the authors)

#### 4. Заключение / Conclusions

Таким образом, на структуру парка влияет множество факторов, к наиболее значимым относят параметры транспортной работы, себестоимость перевозок и надежность. Применение технологического транспорта на газомоторном топливе является одним из наиболее перспективных направлений совершенствования деятельности транспортных подразделений и стратегически важным для энергетического суверенитета страны по критериям экономичности, экологичности и безопасности. Вместе с тем эффективность эксплуатации газомоторных комплектаций существенно зависит от срока службы, качества технического обслуживания топливных систем и степени развитости газозаправочной инфраструктуры в регионах присутствия, что требует внесения дополнительных корректировок для учета частоты расположения АГНКС на пути следования при формировании логистических маршрутов и обязательного дооснащения производственно-технических баз транспортных подразделений специальным оборудованием с проведением дополнительной подготовки обслуживающего персонала. Срок окупаемости затрат на приобретение более дорогих комплектаций грузовых автомобилей на газомоторном топливе в сравнении с аналогами на традиционном топливе сокращается за счет субсидий со стороны государства и низкой стоимости газа (в 2 и более раз). При неполном использовании грузоподъемности это позволяет существенно повысить эффективность транспортного обеспечения технологических процессов по обслуживанию магистральных газопроводов. В ценах августа 2025 г. на территории Российской Федерации топливные затраты для дизельных комплектаций составляют 1.07 руб./т-км. против 0.8 руб./т-км у газодизельных в топливной компоненте, что с учетом разницы в коэффициенте использования полезной массы превышает 25 %. Другим значимым критерием является срок службы, который существенно влияет на себестоимость перевозок в диапазоне от 3 до 7 лет, что ведет к росту на 7–9 % и при недостаточной частоте расположения АГНКС на протяженных маршрутах следования вызывает необходимость применения дизельных комплектаций. При  $S < L$  применение стандартных газодизельных комплектаций экономически оправдано даже при умеренной плотности АГНКС. Исследования показали, что при соблюдении предложенных ограничений по длине ездки и сроку службы себестоимость 1 т-км двухтопливных газомоторных комплектаций седельных тягачей может быть снижена на 18 %, поэтому полученные результаты могут быть использованы для оптимизации структуры парка и повышения экономических показателей эксплуатации автомобилей в транспортных подразделениях газодобывающих производств.

Результаты демонстрируют как значительную сходимость с выводами предшественников в общих тенденциях, так и уточняющий частный вклад в конкретных условиях. Выводы о снижении себестоимости 1 т-км коррелируют с результатами большинства отечественных и зарубежных исследований, где последовательно подтверждается, что основной экономический эффект газомоторной техники формируется за счет более низкой стоимости метана относительно дизельного топлива при условии интенсивной эксплуатации. Выявленное в работе снижение показателей надежности газодизельных тягачей согласуется с исследованиями, посвященными особенностям эксплуатации газобаллонного оборудования, что не противоречит общему тезису о повышенной сложности, но переводит предмет изучения из качественной в количественную плоскость и является развитием идей, заложенных в более ранних работах.

Акцент на критической важности развитости сети АГНКС для экономической эффективности газомоторного парка является общим местом. Принципиальная новизна и меньшая степень прямой сходимости полученных результатов заключается в том, что этот фактор не просто констатируется, а становится ядром формализованной экономико-математической модели, которая позволяет не только констатировать проблему «больших плеч», но и количественно оценить пороговое значение с расчетом себестоимости для смоделированного распределения АГНКС. Таким образом,

результат не опровергает предыдущие исследования, а предоставляет инструмент для проверки и применения теоретических выводов на практике. Классические методики формирования парков и современные методы удаленного мониторинга могут быть дополнены полученными результатами в части практического использования. Если традиционные подходы позволяют рассчитывать необходимое количество техники по характеристикам и производительности, то представленная модель ориентирована на решение задач по оптимизации соотношения дизельной и газовой техники с учетом карты АГНКС и графиков поставок, так как игнорирование этого аспекта может нивелировать топливную экономию на предприятиях и снизить ресурс наиболее уязвимых агрегатов топливной аппаратуры за счет увеличения доли работы в нештатных режимах, что согласуется с концепциями ресурсного обеспечения, поэтому результаты не противоречат ранее установленным закономерностям, а развивают предметную область на основе аналитических инструментов для адресной масштабируемой и количественно обоснованной оптимизации структуры парка.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

**Author contribution.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Захаров Н. С. является членом редакционной коллегии журнала «Архитектура, строительство, транспорт» с 2021 года. Он не принимал участия в принятии решения о публикации статьи, рукопись прошла стандартную процедуру рецензирования, предусмотренную редакционной политикой журнала. Авторам неизвестно о других конфликтах интересов.

**Conflict of interest.** Nikolay S. Zakharov has been a member of the editorial board of the journal "Architecture, Construction, Transport" since 2021. He did not participate in the decision-making process regarding the publication of this article. The manuscript underwent the standard peer-review procedure in accordance with the journal's editorial policy. The authors declare no other conflicts of interest.

#### Список литературы

1. Захаров Н. С. *Моделирование процессов изменения качества автомобилей*. Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет; 1999. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21266500>
2. Захаров Н. С., Сапоженков Н. О. Моделирование процессов формирования уровня заряженности автомобильных аккумуляторных батарей в зимний период. *Современные технологии. Системный анализ. Моделирование*. 2016;(3):232–237.
3. Запорожец А. В., Банкет М. В. Современные проблемы эксплуатации газобаллонных автомобилей, работающих на компримированном природном газе. *Грузовик*. 2023;(10):35–39. <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-35-39>
4. Бабицкий Б. И. Факторы, сдерживающие развитие рынка СПГ в России. *Инновационная наука*. 2023;(11-2):73–77.
5. Захаров Н. С., Новоселов О. А., Ракитин В. А. Методика сравнительной оценки потребительских свойств автомобилей. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2014;(6):158–160. URL: <https://ntvprt.ru/ru/archive-vyuruskov>
6. Кузнецов Е. С. *Управление технической эксплуатацией автомобилей*. 2-е изд., перераб. и доп. Москва: Транспорт; 1990.
7. Шкред Л. Я., Иванов А. В. Об экономической целесообразности использования газодизельных грузовых АТС. *Автомобильная промышленность*. 2014;(1):1–3.
8. Гордеев Д. С., Томаев А. О. Сценарный анализ перспектив применения альтернативных видов топлива в автомобильном транспорте в России. *Мир транспорта*. 2023;21(4):88–98. <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-10>
9. Арыстанбаев Т. С., Аширов А. С., Тохтаров Е. К. Перспективы использования природного газа в качестве моторного топлива. *Транспорт на альтернативном топливе*. 2021;(S1):62–73.

10. Уразметова Л. Р. Показатели оценки развития рынка газомоторного топлива Российской Федерации. *Промышленность: экономика, управление, технологии*. 2023;2(3):47–59.
11. Макарова А. Н. *Методика оперативного корректирования нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий эксплуатации автомобилей: автореферат диссертации кандидата технических наук*. Оренбург: Оренбургский государственный университет; 2016. 16 с.
12. Фурман В. В., Марков В. А., Плахов С. В. Использование газомоторного топлива в автомобильных газодизелях. *Автомобильная промышленность*. 2023;(3)19–24.
13. Дубов Г. М., Яцевич М. Ю., Бороненков Д. А., Якобсон Д. М. Опыт использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на технологическом транспорте. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(3):73–81. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-3-73-81>
14. Хатьков В. Ю. Состояние рынка производства и использования газомоторного топлива. *Вестник Белгородского университета кооперации, экономики и права*. 2022;(3):182–194. <https://doi.org/10.21295/2223-5639-2022-3-182-194>
15. Старцев А. В., Сторожев И. И., Цихалевский И. С., Мишин Я. А., Шарапов А. Т. Теоретические предпосылки перевода тягового подвижного состава на газомоторное топливо. *Транспорт Урала*. 2023;(3):75–78. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-75-78>
16. Каменский Д. И., Шрам В. Г. Математическая модель использования сжиженного нефтяного газа в качестве газомоторного топлива. *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. 2023;(3):416–420.
17. Hall C., Kassa M. Advances in combustion control for natural gas–diesel dual fuel compression ignition engines in automotive applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;148:111291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111291>
18. Rotaru S., Pana C., Negurescu N., Cernat A., Fuiorescu D., Nutu Cr. Experimental investigations of an automotive diesel engine fuelled with natural gas in dual fuel mode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;997:012130. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012130>
19. Thipse S. Advancing Sustainable and Intelligent Mobility: Integrating Machine Learning, Alternative Fuels and Innovative Technologies. *ARAI Journal of Mobility Technology*. 2025;5. <https://doi.org/10.37285/ajmt.5.4.0>
20. Дубов Г. М., Яцевич М. Ю., Якобсон Д. М., Бороненков Д. А. Особенности и перспективы использования сжиженного природного газа как газомоторного топлива на автотранспорте. *Маркшейдерия и недропользование*. 2025;25(2):41–52. <https://doi.org/10.56195/20793332-2025-25-2-41-48>

#### References

1. Zakharov N. S. *Simulation of processes of change in quality cars*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 1999. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=21266500>
2. Zakharov N. S., Sapozhenkov N. O. Modelling of formation car batteries level of charge in winter. *Modern Technologies. System Analysis. Modeling*. 2016;(3):232–237. (In Russ.)
3. Zaporozhets A. V., Banket M. V. Modern problems of operation of gas-cylinder cars running on compressed natural gas. *Gruzovik*. 2023;(10):35–39. (In Russ.) <https://doi.org/10.36652/1684-1298-2023-10-35-39>
4. Babitskiy B. I. Factors hindering the development of the LNG market in Russia. *Innovation Science*. 2023;(11-2):73–77. (In Russ.)
5. Zakharov N. S., Novoselov O. A., Rakitin V. A. A method of a comparative assessment of cars consumer properties. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. (In Russ.) 2014;(6):158–160. URL: <https://ntvprt.ru/ru/archive-vypuskov>
6. Kuznetsov Ye. S. *Management of technical operation of vehicles*. 2<sup>nd</sup> edition, revised. Moscow: Transport; 1990. (In Russ.)
7. Shkret L. Ya., Ivanov A. V. On the economic feasibility of using gas-diesel freight vehicles. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2014;(1):1–3. (In Russ.)
8. Gordeev D.S., Tomaev A.O. Scenario Analysis of the Prospects for the Use of Alternative Fuels for Road Transport in Russia. *World of Transport and Transportation*. 2023;21(4):88–98. (In Russ.) <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2023-21-4-10>
9. Arystanbayev T. S., Ashirov A. S., Tokhtarov Ye. K. Prospects for using natural gas as a motor fuel. *Transport na al'ternativnom toplive*. 2021;(S1):62–73. (In Russ.)

10. Urazmetova L. R. Indicators for assessing the development of the Russian gas engine fuel market. *Industry: Economics, Management, Technology*. 2023;2(3):47–59. (In Russ.)
11. Makarova A. N. *Methodology for promptly adjusting maintenance interval standards based on actual vehicle operating conditions: Abstract of a candidate's dissertation*. Orenburg: Orenburg State University; 2016. 16 p. (In Russ.)
12. Furman V. V., Markov V. A., Plakhov S. V. Use of gas motor fuel in automobile gas diesel engines. *Avtomobil'naya promyshlennost'*. 2023;(3)19–24. (In Russ.)
13. Dubov G. M., Yatsevich M. Y., Boronenkov D. A., Yakobson D. M. Experience in the use of liquefied natural gas as a gas motor fuel in technological transport. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;(3):73–81. (In Russ.) <https://doi.org/10.56195/207933322025-25-3-73-81>
14. Khatkov V. Yu. State of the market for the production and use of natural gaz motor fuel. *Herald of the Belgorod University of Cooperation, Economics and Law*. 2022;(3):182–194. (In Russ.) <https://doi.org/10.21295/2223-5639-2022-3-182-194>
15. Startsev A. V., Storozhev I. I., Tsikhalevskiy I. S., Mishin Ya. A., Sharapov A. T. Theoretical background of the transfer of traction rolling stock to gas engine fuel. *Transport of the Urals*. (In Russ.) 2023;(3):75–78. <https://doi.org/10.20291/1815-9400-2023-3-75-78>
16. Kamensky D. I., Shram V. G. Mathematical model of the use of liquefied petroleum gas as a gas engine fuel. *Izvestiya Tula State University*. 2023;(3):416–420.
17. Hall C., Kassa M. Advances in combustion control for natural gas–diesel dual fuel compression ignition engines in automotive applications: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021;148:111291. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111291>
18. Rotaru S., Pana C., Negurescu N., Cernat A., Fuiorescu D., Nutu Cr. Experimental investigations of an automotive diesel engine fuelled with natural gas in dual fuel mode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;997:012130. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/997/1/012130>
19. Thipse S. Advancing Sustainable and Intelligent Mobility: Integrating Machine Learning, Alternative Fuels and Innovative Technologies. *ARAI Journal of Mobility Technology*. 2025;5. <https://doi.org/10.37285/ajmt.5.4.0>
20. Dubov G. M., Yatsevich M. Yu., Yakobson D. M., Boronenkov D. A. Peculiarities and prospects for the use of liquefied natural gas as a gas motor fuel in motor vehicles. *Mine Surveying and Subsurface Use*. 2025;25(2):41–48. (In Russ.). <https://doi.org/10.56195/207933322025-25-2-41-48>



### Информация об авторах

**Захаров Николай Степанович**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [zakharovns@tyuiu.ru](mailto:zakharovns@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8415-0505>

**Сапоженков Николай Олегович**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [sapozhenkovno@tyuiu.ru](mailto:sapozhenkovno@tyuiu.ru)

**Ракитин Владимир Александрович**, соискатель кафедры сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, [rakitinva@mail.ru](mailto:rakitinva@mail.ru)

### Information about the authors

**Nikolay S. Zakharov**, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automotive Service and Technological Machinery, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, [zakharovns@tyuiu.ru](mailto:zakharovns@tyuiu.ru), <https://orcid.org/0000-0001-8415-0505>

**Nikolay O. Sapozhenkov**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Automotive Service and Technological Machinery, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, [sapozhenkovno@tyuiu.ru](mailto:sapozhenkovno@tyuiu.ru)

**Vladimir A. Rakitin**, Applicant in the Department of Automotive Service and Technological Machinery, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, [rakitinva@mail.ru](mailto:rakitinva@mail.ru)

Получена 20 января 2025 г., одобрена 05 декабря 2025 г., принятая к публикации 10 декабря 2025 г.  
Received 20 January 2025, Approved 05 December 2025, Accepted for publication 10 December 2025



## Управление загрузкой станции технического обслуживания автомобилей с использованием теории расписаний

Е. С. Козин, А. В. Мальшаков

Тюменский индустриальный университет

Тюмень, ул. Володарского, 38, 625000, Российская Федерация

albert\_nord@mail.ru



**Аннотация.** Эффективное управление загрузкой производственной зоны станции технического обслуживания является ключевым фактором повышения качества клиентского сервиса и операционной эффективности. Предлагаемый подход к оптимизации распределения транспортных средств по постам технического обслуживания основан на методе теории расписаний и учитывает специализацию постов, приоритеты клиентов и минимизацию времени ожидания. Разработан алгоритм динамического назначения задач, реализованный на языке Python с использованием жадной стратегии, ориентированной на раннее освобождение ресурсов. Для практического применения создано программное приложение с веб-интерфейсом и модулем визуализации расписания. Разработанный программный продукт может быть интересен предприятиям технического сервиса автомобилей и специальной техники для управления загрузкой сервисной зоны. Предложенный подход обеспечивает баланс между вычислительной эффективностью и качеством расписания, что делает его пригодным для реального применения в условиях городских СТО.

**Ключевые слова:** теория расписаний, управление станциями технического обслуживания, оптимизация загрузки СТО, управление загрузкой производственной зоны

**Для цитирования:** Козин Е. С., Мальшаков А. В. Управление загрузкой станции технического обслуживания автомобилей с использованием теории расписаний. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):100–109. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-100-109> EDN: ANFCXO

## Managing the loading of a car service station using scheduling theory

Evgeniy S. Kozin, Albert V. Malshakov

Industrial University of Tyumen

Tyumen, 38 Volodarskogo St., 625000, Russian Federation

albert\_nord@mail.ru



**Abstract.** Effective management of the service station's production area load is a key factor in improving customer service quality and operational efficiency. The proposed approach to optimizing vehicle distribution among service stations is based on scheduling theory and takes into account station specialization, customer priorities, and waiting time minimization. A dynamic task assignment algorithm, implemented in Python, is developed using a greedy strategy focused on early resource release. A software application with a web interface and a schedule visualization module has been created for practical application. This software product may be of interest to automotive and specialized equipment service companies for managing service station loads. The proposed approach provides a balance between computational efficiency and schedule quality, making it suitable for real-world application in urban service stations.

**Keywords:** scheduling theory, service station managing, service station load optimization, production area load management

**For citation:** Kozin E. S., Malshakov A. V. Managing the loading of a car service station using scheduling theory. *Architecture, Construction, Transport.* 2025;5(4):100–109. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-100-109>



## 1. Введение / Introduction

Современные станции технического обслуживания (СТО) автомобилей сталкиваются с необходимостью обработки неоднородного потока заявок при ограниченных производственных ресурсах. Отсутствие системного подхода к распределению автомобилей по постам приводит к несбалансированной загрузке, увеличению времени ожидания и снижению удовлетворенности клиентов. Традиционные методы, основанные на ручном планировании, или простых правилах FCFS (First Come, First Served (первым пришел – первым обслужен)), не учитывают такие факторы, как специализация оборудования, квалификация персонала и приоритетные категории клиентов.

Теория расписаний (Scheduling Theory) предлагает математический аппарат для решения подобных задач, однако ее применение в сфере автосервиса остается недостаточно исследованным. Особенno актуален вопрос разработки практически реализуемых алгоритмов, сочетающих адекватную точность с низкими вычислительными затратами, что критично для малых и средних предприятий. В данной работе представлен подход к управлению производственной зоной СТО, основанный на модифицированной задаче о параллельных машинах с ограничениями совместимости и приоритетами. Описана программная реализация на языке Python и указаны направления оценки эффективности pilotного внедрения программного продукта управления загрузкой в условиях реального автосервиса.

Несмотря на развитость общей теории, вопрос ее применения именно к станциям технического обслуживания остается недостаточно освещенным в научной литературе [1, 2]. Большинство публикаций фокусируется на моделях массового обслуживания (Queueing Theory), информационных системах и CRM, эвристической оценке направлений оптимизации производственных процессов, а также на оптимизации на основе программирования с ограничениями (Constraint Programming). Например, в работе [3] СТО смоделирована как система с очередями, дана оценка среднего времени ожидания и вероятности отказа. Однако такие модели не решают задачу конкретного назначения автомобиля на пост и не учитывают разнородность операций и ресурсов. В [4] описана архитектура цифровых платформ для управления СТО, включая модули записи и учета. Однако алгоритмическая часть планирования часто сводится к простым правилам очередности обработки заявок без оптимизации расписания. Отдельные исследователи применяют генетические алгоритмы или имитацию отжига для расчета расписаний на СТО. Хотя такие подходы могут давать качественные решения, они требуют значительных вычислительных ресурсов и сложны в отладке, что снижает их практическую применимость в малом бизнесе. Платформы вроде Google OR-Tools предлагают готовые модели для задач управления производственными заданиями (обычных и гибких задач календарного планирования – Job Shop и Flexible Job Shop)<sup>1,2</sup>. Однако их применение в деятельности СТО требует адаптации к динамике поступления заявок, приоритетам клиентов, непрерывности смен.

<sup>1</sup> Google OR-Tools. Scheduling Overview. URL: <https://developers.google.com/optimization/scheduling> (дата обращения: 08.09.2025).

<sup>2</sup> Streamlit Documentation. Building Data Apps in Python. URL: <https://docs.streamlit.io> (дата обращения: 08.09.2025).

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Рассмотрим СТО со множеством постов  $B = \{b_1, b_2, \dots, b_m\}$ . Каждый пост  $b_i$  характеризуется множеством допустимых типов работ  $C_i \subseteq \{1, 2, 3\}$ , где 1 – техническое обслуживание (ТО); 2 – диагностика и текущий ремонт; 3 – ремонт с большой трудоемкостью (капитальный ремонт).

Поступает множество клиентских заявок  $J = \{j_1, j_2, \dots, j_n\}$ , где каждая заявка  $j_k$  задается тройкой показателей:

- $a_k$  – время прибытия (arrival time),
- $\tau_k \in \{1, 2, 3\}$  – тип работы,
- $\rho_k \in \{0, 1\}$  – приоритет (0 – VIP, 1 – стандартный).

Время выполнения работы типа  $\tau$  фиксировано и равно  $t_\tau$  (например,  $t_1 = 30$ ,  $t_2 = 60$ ,  $t_3 = 120$  минут).

Требуется назначить каждую заявку на один из постов  $b_i$ , для которого  $\tau_k \in C_i$ , так, чтобы:

- минимизировать суммарное (или максимальное) время ожидания:

$$W_k = s_k - a_k, \quad (1)$$

где  $s_k$  – время начала обслуживания;

- максимизировать коэффициент загрузки постов  $\rho$ :

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^m t_{\tau_k}}{\sum_{i=1}^m T_{\text{смена}}}. \quad (2)$$

Задача относится к классу NP-трудных, однако в условиях динамического поступления заявок (Online Scheduling) точные методы (MILP, CP) малоприменимы, поэтому предлагается эффективный эвристический алгоритм.

Алгоритм основан на стратегии самого раннего доступного совместимого бокса (Earliest Available Compatible Bay – EACB) с учетом приоритетов [5]:

1. Все заявки сортируются по невозрастанию приоритета, затем по времени прибытия:

$$(\rho_k, a_k) \rightarrow \text{asc.} \quad (3)$$

2. Для каждой заявки:

формируется подмножество совместимых постов:

$$B' = \{b_i \in B \mid \tau_k \in C_i\}; \quad (4)$$

выбирается пост:

$$b^* = \underset{b_i \in B'}{\text{argmin}} \text{available\_time}(b_i); \quad (5)$$

заявка назначается на  $b^*$  с началом

$$s_k = \max(a_k, \text{available\_time}(b^*)); \quad (6)$$

время освобождения поста обновляется:

$$\text{available\_time}(b^*) \leftarrow s_k + t_{\tau_k}. \quad (7)$$

В качестве целевой функции может быть использовано следующее выражение:

$$\min \left( \alpha \cdot \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (s_k - a_k) + \beta \cdot (1 - \rho) \right), \quad (8)$$

где  $s_k$  – время начала обслуживания заявки  $j_k$ ,

$\rho$  – коэффициент загрузки постов,

$\alpha, \beta$  – весовые коэффициенты, определяемые эмпирическим путем на основе эксперимента [6].

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Алгоритм решения в обобщенном виде представлен на рис. 1.

Алгоритм работает в пакетном режиме (все заявки на расчетный период известны заранее), что типично для внутриоперационного планирования смены на СТО, и состоит из следующих основных шагов.

#### Шаг 1. Ввод исходных данных.

Для каждого поста задается множество типов работ, которые он может выполнять (например, пост 1 – только ТО и текущий ремонт, пост 2 – текущий и капитальный ремонт).

Для каждого автомобиля-клиента указываются:

- время прибытия на СТО,
- тип требуемых технических воздействий (1 – ТО, 2 – диагностика/текущий ремонт, 3 – капитальный ремонт),
- приоритет (VIP или стандартный).

Известно фиксированное нормативное время выполнения для каждого типа работ (например, 30, 60 и 120 минут соответственно).

#### Шаг 2. Сортировка заявок.

Все клиентские заявки сортируются по следующему правилу. В первую очередь реализуется сортировка по возрастанию приоритета (VIP-клиенты идут раньше). При равенстве приоритета реализуется сортировка по возрастанию времени прибытия. Это обеспечивает соблюдение принципа приоритетного обслуживания без ущерба для порядка поступления.

#### Шаг 3. Последовательное назначение заявок на посты.

Для каждой заявки в отсортированном списке выполняются следующие этапы.

1. Фильтрация совместимых постов. Из общего списка постов выбираются только те, которые могут выполнить данный тип работы (в соответствии с их специализацией).
2. Выбор оптимального поста. Среди совместимых постов выбирается тот, который освободится раньше всего (имеет минимальное время завершения предыдущих работ).
3. Назначение и расчет времени начала, окончания обслуживания и освобождения поста. Время начала обслуживания автомобиля определяется как максимум из времени его прибытия и времени освобождения выбранного поста. Время окончания равно сумме времени начала и нормативного времени выполнения работы. Время освобождения выбранного поста обновляется значением времени окончания обслуживания.

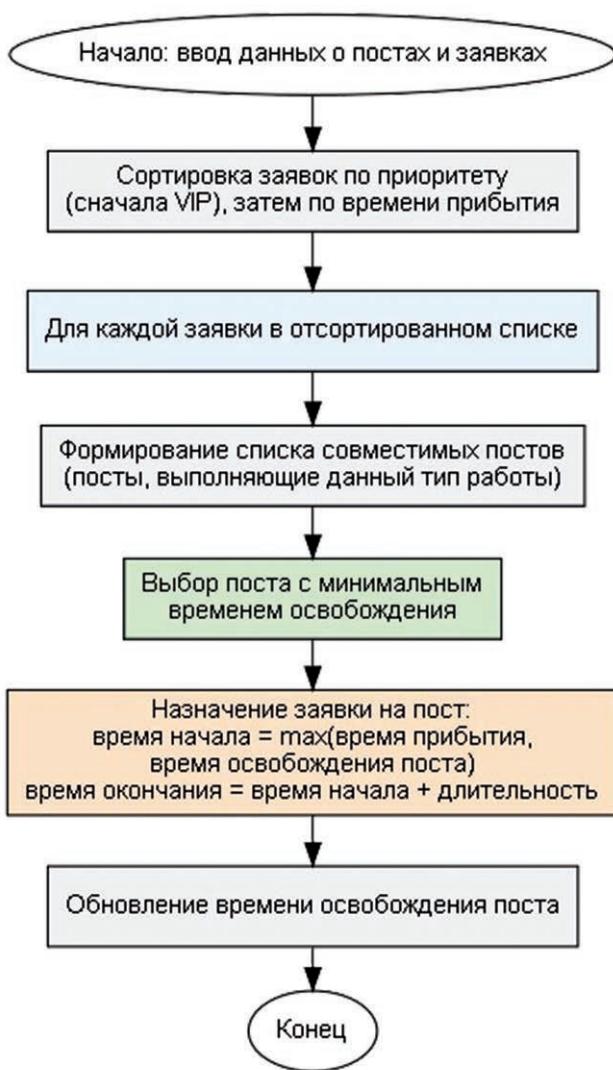


Рис. 1. Алгоритм формирования расписания распределения автомобилей по постам технического обслуживания и ремонта (схема составлена авторами)

Fig. 1. Algorithm for forming the schedule to distribute vehicles among maintenance and repair posts (scheme complied by the authors)

#### Шаг 4. Формирование итогового расписания.

После обработки всех заявок формируется полное расписание, содержащее для каждой заявки:

- идентификатор клиента,
- назначенную работу и ее тип,
- выделенный пост,
- время начала и окончания обслуживания,
- время ожидания (разность между началом и моментом прибытия).

Особенностью алгоритма является использование жадной стратегии. На каждом шаге принимается локально оптимальное решение (минимизация времени начала), что обеспечивает низкую вычислительную сложность  $O(n \cdot m)$ , где  $n$  – число заявок,  $m$  – число постов. Алгоритм корректно обрабатывает случаи, когда ни один пост не может выполнить работу, выдавая предупреждение. Алгоритм позволяет соблюдать баланс целей, когда приоритеты управляют очередностью, а выбор самого раннего свободного поста способствует равномерной загрузке и сокращению простоев [7].

В результате формируется расписание для каждой заявки с учетом ее характеристик и параметров занятости постов. Оно представлено в виде временной диаграммы Ганта (рис. 2) [8].

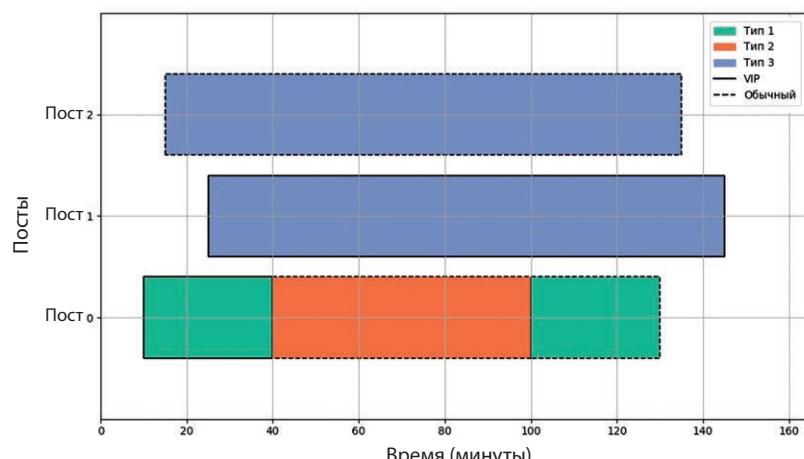


Рис. 2. Распределение автомобилей по постам (диаграмма построена авторами)  
Fig. 2. Vehicle distribution among service station posts (diagram complied by the authors)

Реализация `sto_scheduler_app.py` выполнена на языке Python 3.10 с использованием следующих компонентов. Ядро расчета реализовано на основе встроенных структур данных. Интерфейс: веб-приложение на Streamlit, обеспечивающее настройку конфигурации постов, ввод и редактирование списка клиентов, визуализацию расписания в виде диаграммы Ганта. Визуализация реализована с помощью библиотеки matplotlib с экспортом в PNG/PDF для отчетов [9].

Программный код структурирован в соответствии с принципами модульности, что позволяет легко интегрировать решение в существующие информационные системы СТО (рис. 3–5).

Оценка эффективности предложенного подхода может быть проведена путем сравнительного эксперимента с использованием двух групп: контрольной группы, предполагающей формирование расписания администратором СТО вручную (традиционный метод), и экспериментальной группы, в которой расписание генерируется разработанным алгоритмом.

Важными показателями такой оценки являются:

- среднее и максимальное время ожидания клиента,
- коэффициент загрузки постов,

## 🛠 Пилотная система управления СТО

Распределение автомобилей по постам с учетом специализации, приоритетов и минимизации ожидания.

### 1. Настройка постов СТО

Количество постов

3 - +

**Пост 0**

ТО (легкое)  Диагностика  Капитальный ремонт

**Пост 1**

ТО (легкое)  Диагностика  Капитальный ремонт

**Пост 2**

ТО (легкое)  Диагностика  Капитальный ремонт

Рис. 3. Ввод количества постов и их специализации (скрин главного окна программы)

Fig. 3. Filling in the number of service station posts and their specialization (Screenshot of the main program window)

### 3. Результаты распределения

Клиент (прибыл)	Тип работы	Приоритет	Назначение на пост	Начало	Окончание	Ожидание (мин.)
10	ТО (легкое)	VIP		0	10	40
0	Диагностика	Обычный		1	0	60
30	ТО (легкое)	Обычный		2	30	60



Рис. 5. Вывод и визуализация результатов распределения клиентов по постам техобслуживания и ремонта (скрин окна программы)

Fig. 5. Output and visualization of customer distribution by maintenance and repair posts (program window screenshot)

- количество простоев продолжительностью более 30 минут,
- время реакции на приоритетные заявки.

Для статистической обработки полученных данных можно использовать описательные методы (среднее, стандартное отклонение) [10].

Предложенный подход демонстрирует высокую практическую применимость методов теории расписаний в сфере автосервиса. Эвристический алгоритм обеспечивает баланс между качеством расписания и вычислительной простотой, что критично для предприятий малого и среднего бизнеса.

Для объективного сравнения эффективности стандартной практики распределения заявок и разработанного алгоритма на основе теории расписаний была построена имитационная модель работы станции технического обслуживания. Модель воспроизводит работу СТО с пятью постами, различающимися по специализации, и обрабатывает поток из 120 клиентских заявок, сформированный на основе реалистичных статистических распределений (времени прибытия – пуассоновский процесс, типов работ – согласно средней структуре спроса в городском автосервисе, доли VIP-клиентов – 15 %).

### 2. Список клиентов

Время прибытия (мин.)	Тип работы	VIP-клиент
0	Диагностика	<input type="checkbox"/>
10	ТО (легкое)	<input checked="" type="checkbox"/>
20	Капитальный ремонт	<input type="checkbox"/>
30	ТО (легкое)	<input type="checkbox"/>

Рис. 4. Ввод списка клиентов и типа заявленных работ по техобслуживанию и ремонту (скрин окна программы)

Fig. 4. Filling in the list of clients and the type of maintenance and repair work requested (program window screenshot)

В рамках модели реализованы два сценария планирования:

- стандартный подход: в нем распределение автомобилей по постам имитирует типичную ручную практику FCFS (First Come, First Served) с учетом совместимости постов, но без оптимизации по времени освобождения и учета приоритета (VIP-клиенты обслуживаются в порядке очереди);
- предлагаемый подход: распределение выполняется по разработанному алгоритму ЕАСВ (Earliest Available Compatible Bay) с сортировкой заявок по приоритету и выбором поста с минимальным временем освобождения.

Результаты моделирования представлены в таблице 1.

Таблица 1. Оценка эффективности предлагаемого подхода на имитационной модели по сравнению с ручным распределением заявок по постам

Table 1. Efficiency assessment of the suggested approach based on simulation model compared with the manual distribution of applications by service station posts

Показатель	Стандартный подход (FCFS)	Предлагаемый подход (ЕАСВ)	Абсолютное улучшение	Относительное улучшение
Среднее время ожидания клиента, мин	49.3	38.1	-11.2	-22.7 %
Максимальное время ожидания, мин	115	86	-29	-25.2 %
Среднее время ожидания VIP-клиентов, мин	43.8	29.0	-14.8	-33.8 %
Коэффициент загрузки постов, %	71.6	88.4	+16.8	+23.5 %
Общая продолжительность смены (makespan), мин	425	398	-27	-6.4 %
Количество простоев >30 мин на пост	15	6	-9	-60.0 %

Результаты имитационного эксперимента показали, что даже при одинаковом входящем потоке заявок и идентичной конфигурации постов применение алгоритма ЕАСВ, основанного на принципах теории расписаний, обеспечивает систематическое улучшение ключевых операционных показателей [11, 12].

#### 4. Заключение / Conclusions

Разработанное приложение позволяет оперативно реагировать на изменения потока заявок и эффективно использовать производственные ресурсы. Наиболее значимый эффект достигнут в сервисной составляющей: снижение среднего времени ожидания более чем на 22 %, а для приоритетных клиентов – почти на 34 %. Одновременно достигается более рациональное использование производственных мощностей: коэффициент загрузки постов возрастает до 88,4 %, а число неэффективных простоев сокращается на 60 %.

Направлением дальнейших исследований является апробация разработанного метода в условиях работы реального предприятия, интеграция приложения с CRM-системами для автоматического импорта заявок, использование методов машинного обучения для прогнозирования времени выполнения работ и расширение модели на случай неопределенности (формирование стохастического расписания).

По результатам исследования можно сделать вывод, что эффективность предложенного подхода значительно выше стандартного. Оценивалась производительность по следующим показате-

лям: среднему и максимальному времени ожидания клиента, коэффициенту загрузки постов, количеству простоеv и времени приоритетной заявки.

Данный программный продукт может быть интересен предприятиям технического сервиса автомобилей и специальной техники для управления загрузкой сервисной зоны как госкорпораций, так и частного бизнеса, так как обеспечивает баланс между вычислительной эффективностью и качеством расписания.

 **Вклад авторов:** Козин Е. С.: разработка идеи, гипотезы исследования, планирование и проведение исследования, включая сбор данных и их анализ. Мальшаков А. В.: проведение исследования, включая сбор данных и их анализ, редактирование рукописи, создание визуализаций и других графических представлений данных.

**Author contributions:** Evgeniy S. Kozin: development of research ideas, hypothesis, planning and conducting research, including data collection and analysis. Albert V. Malshakov: conducting research, including data collection and analysis, editing the manuscript, and creating visualizations and other graphical representations of the data.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Зуб И. В., Ежов Ю. Е., Касаткин Г. Д. Применение теории расписаний в организации работы морского порта. В сб.: *Логистика: современные тенденции развития: Материалы XXIV Международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 10–11 апреля 2025 года*. Санкт-Петербург: Государственный университет морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова; 2025. С. 162–167.
2. Григорьева Е. Г., Курко Д. И. Сравнительный анализ некоторых алгоритмов из теории расписаний. В сб.: *Донецкие чтения – 2025: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы X Международной научной конференции, посвященной 60-летию создания Донецкого научного центра, Донецк, 05–07 ноября 2025 года*. Донецк: Донецкий государственный университет; 2025. С. 186–188.
3. Могилев А. А. Обзор методов решения задач теории расписаний. *Информатика, вычислительная техника и инженерное образование*. 2019;(4):19–32. <https://www.elibrary.ru/pafcss>
4. Pinedo M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 6<sup>th</sup> edition. New York: Springer; 2022. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-05921-6>
5. Brucker P. *Scheduling Algorithms*. 5<sup>th</sup> edition. Berlin: Springer; 2007. URL: [http://old.math.nsc.ru/LBRT/k5/Scheduling/BruckerSchedulingAlgorithms\\_Full.pdf](http://old.math.nsc.ru/LBRT/k5/Scheduling/BruckerSchedulingAlgorithms_Full.pdf)
6. Denisov M. V., Kamaev V. A., Kizim A. V. Organization of the repair and maintenance in road sector with ontologies and multi-agent systems. *Procedia Technology*. 2013;9:819–825. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.091>
7. Куприянов Б. В., Рощин А. А. Решение flow shop задачи теории расписаний в рекурсивном представлении. В сб.: *XIV Всероссийское совещание по проблемам управления, Москва, 17–20 июня 2024 года*. Москва: Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН; 2024. С. 1860–1864. <https://vspu2024.ipu.ru/proceedings/1860.pdf>
8. Денисюк Д. М., Архипова Н. А. Теория расписания в задачах железнодорожного транспорта. В сб.: *Дни студенческой науки: Сборник материалов 52-й научной конференции обучающихся ПривГУПС, Самара, 01–25 апреля 2025 года*. Самара: Приволжский государственный университет путей сообщения; 2025. С. 67–69.
9. Захаров В. В., Соколов Б. В. Системно-кибернетический подход к описанию и решению задач теории расписаний. *Процессы управления и устойчивость*. 2025;12(S2-1):233–234.
10. Козин Е. С., Мальшаков А. В. Моделирование изменения интенсивности эксплуатации автомобилей в течение года. *Транспортное машиностроение*. 2024;(1):64–71. <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-1-64-71>

11. Козин Е. С., Мальшаков А. В. Использования нейронных сетей для распознавания запасных частей для обслуживания автомобилей. В сб.: *Научная территория: технологии и инновации: Материалы Международной научно-практической конференции, Тюмень, 2023*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2023 С. 215–217. <https://www.elibrary.ru/oykzbq>
12. Веревкин Н. И., Мальшаков А. В. Влияние отрицательных температур на прочностные характеристики пневмоподвески. *Научное обозрение*. 2017;(6):57–61.

### References

1. Zub I. V., Yezhov YU. YE., Kasatkin G. D. Application of scheduling theory in organizing the work of a seaport. In: *Logistika: sovremennoye tendentsii razvitiya: Materialy XXIV Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Saint Petersburg, April 10–11, 2025*. Saint Petersburg: Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping; 2025. P. 162–167. (In Russ.)
2. Grigor'yeva YE. G., Kurko D. I. Comparative analysis of some algorithms from scheduling theory. In: *Donetskiye chteniya – 2025: obrazovaniye, nauka, innovatsii, kul'tura i vyzovy sovremennosti: Materialy X Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii, posvyashchennoy 60-letiyu sozdaniya Donetskogo nauchnogo tsentra, Donetsk, November 5–7, 2025*. Donetsk: Donetsk State University; 2025. P. 186–188. (In Russ.)
3. Mogilev A. A. Review of methods for solving the scheduling theory problems. *Informatika, vychislitel'naya tekhnika i inzhenernoye obrazovaniye*. 2019;(4):19–32. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/pafcss>
4. Pinedo M. L. *Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems*. 6<sup>th</sup> edition. New York: Springer; 2022. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-031-05921-6>
5. Brucker P. *Scheduling Algorithms*. 5<sup>th</sup> edition. Berlin: Springer; 2007. URL: [http://old.math.nsc.ru/LBRT/k5/Scheduling/BruckerSchedulingAlgorithms\\_Full.pdf](http://old.math.nsc.ru/LBRT/k5/Scheduling/BruckerSchedulingAlgorithms_Full.pdf)
6. Denisov M. V., Kamaev V. A., Kizim A. V. Organization of the repair and maintenance in road sector with ontologies and multi-agent systems. *Procedia Technology*. 2013;9:819–825. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2013.12.091>
7. Kupriyanov B. V., Roshchin A. A. Solution of the flow shop problem in scheduling theory in recursive representation. In: *XIV Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya, Moscow, June 17–20, 2024*. Moscow: V. A. Trapeznikov Institute of Control Sciences of Russian Academy of Sciences; 2024. P. 1860–1864. (In Russ.) <https://vspu2024.ipu.ru/proceedings/1860.pdf>
8. Denisyuk D. M., Arkhipova N. A. Scheduling theory in railway transport problems. In: *Dni studencheskoy nauki: Sbornik materialov 52-iy nauchnoy konferentsii obuchayushchikhsya PriVGUPS, Samara, April 1–25, 2025*. Samara: Volga State Transport University; 2025. P. 67–69. (In Russ.)
9. Zakharov V. V., Sokolov B. V. System-cybernetic approach to the description and solution of problems in the theory of schedules. *Control processes and stability*. 2025;12(S2-1):233–234. (In Russ.)
10. Kozin E., Malshakov A. Simulation of changes in car operation rate during the year. *Transport Engineering*. 2024;(1):64–71. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/2782-5957-2024-1-64-71>
11. Kozin Ye. S., Mal'shakov A. V. Using neural networks to recognize spare parts for car maintenance. In: *Nauchnaya territoriya: tekhnologii i innovatsii: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen, 2023*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2023. P. 215–217. (In Russ.) <https://www.elibrary.ru/oykzbq>
12. Verevkin N. I., Mal'shakov A. V. Negative temperature impact on the durability properties of air suspension. *Nauchnoye obozreniye*. 2017;(6):57–61. (In Russ.)



### Информация об авторах

**Козин Евгений Сергеевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, kozines@tuuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6774-3285>

**Мальшаков Альберт Владимирович**, канд. техн. наук, доцент кафедры интеллектуальных систем и технологий, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, albert\_nord@mail.ru

**Information about the authors**

**Evgeniy S. Kozin**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Car Service and Technological Machines, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, kozines@tyuuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6774-3285>

**Albert V. Malshakov**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Intelligent Systems and Technologies, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, albert\_nord@mail.ru

*Получена 20 сентября 2025 г., одобрена 11 декабря 2025 г., принята к публикации 19 декабря 2025 г.*  
*Received 20 September 2025, Approved 11 December 2025, Accepted for publication 19 December 2025*

## Правила подготовки рукописи

1. К предоставляемой рукописи должны быть приложены следующие документы:
  - сопроводительное письмо автора на имя главного редактора журнала, подтверждающее, что статья нигде ранее не была опубликована;
  - экспертное заключение организации, откуда исходит рукопись, о возможности открытого опубликования.
2. Все поступающие в редакцию журнала рукописи статьи проходят проверку на наличие заимствований в системе «Антиплагиат». Статьи, содержащие менее 75 % оригинального текста, в журнале не публикуются (проверка уникальности текста осуществляется без учета метаданных и библиографического списка).
3. Рукописи, соответствующие тематике журнала, отправляются двум рецензентам, проходят процедуру двойного слепого рецензирования с целью их экспертной оценки. Рецензенты являются признанными специалистами по тематике рецензируемых материалов. Рецензии хранятся в редакции в течение 5 лет.
4. Требования к тексту.

**Формат файлов для текста** – Microsoft Word (\*.docx). Название файла должно включать фамилию и инициалы автора статьи (например: Иванов\_ИИ.docx). Статьи, содержащие формулы, помимо word-файла необходимо продублировать pdf-файлом во избежание искажения формул, которые следует набирать в MathType 4.0 Equation.

**Объем статьи** – не менее 5 и не более 15 страниц (не включая библиографический список). Размер шрифта 12 пт (Times New Roman), межстрочный интервал одинарный, абзац 0.5 см. Поля страниц: верхнее 20 мм, нижнее 20 мм, левое 20 мм, правое 20 мм.

**Все графические объекты** должны быть предоставлены отдельными файлами: один рисунок – один файл графического формата. Растровые рисунки (фото) предоставляются в формате JPG с разрешением не менее 300 dpi. Каждый рисунок должен быть помещен в текст и сопровождаться нумерованной подрисуночной подписью. Ссылки на рисунки в тексте обязательны.

**Таблицы** следует помещать в текст статьи, они должны иметь нумерацию, заголовок и четко обозначенные графы, удобные и понятные для чтения. Ссылки на таблицы в тексте обязательны.

**Объем иллюстративных материалов** (таблиц и графических материалов) не должен превышать 1/3 общего объема рукописи.

**Список литературы** (не менее 20 источников) должен содержать ссылки на актуальные научные работы отечественных и зарубежных специалистов. Объем самоцитирования – не более 30 % от общего числа ссылок.

**Нумерация использованных источников в списке** дается в порядке упоминания в тексте. На все источники должны быть ссылки в тексте статьи в квадратных скобках. В списке не должно быть неавторизованных источников (СП, СНиПов, ГОСТов и т. п.) – на них ссылки даются непосредственно в тексте статьи.

5. Рукопись статьи должна включать:
  - индекс УДК;
  - название статьи;
  - инициалы и фамилию автора,

- аффилиацию автора;
- аннотацию (130–180 слов);
- ключевые слова (5–7 слов и (или) словосочетаний);
- благодарности (информация о грантовой поддержке, при которой было реализовано исследование, а также благодарность в адрес других ученых и/или предприятий, оказавших содействие в реализации исследования);
- основной текст статьи;
- вклад авторов;
- конфликт интересов;
- список литературы (не менее 20 источников);
- сведения об авторах: полные Ф.И.О., должность, ученая степень, звание, место работы, e-mail, ORCID.

**6.** Структура основного текста статьи должна включать следующие рубрики, согласно стандарту IMRAD:

- **Введение.** Включает актуальность исследования, обзор литературы по теме исследования, постановку проблемы, формулирование цели и задач исследования.
- **Материалы и методы / Методы.** Данный раздел включает детальное описание методов и схемы экспериментов/наблюдений, позволяющих воспроизвести их результаты, пользуясь только текстом статьи; материалы, приборы, оборудование и другие условия проведения экспериментов/наблюдений.
- **Результаты и обсуждение.** Результаты рекомендуется представлять преимущественно в виде таблиц, графиков и иных наглядных формах. Этот раздел включает анализ полученных результатов, их интерпретацию, сравнение с результатами других авторов.
- **Заключение.** Подводятся итоги научного исследования. Заключение содержит выводы, кратко формулирующие основные научные результаты статьи. Выводы должны логически соответствовать поставленным в начале статьи задачам, содержать краткие итоги разделов статьи без повторения формулировок, приведенных в них.

**7.** Рукопись, допущенная к публикации, проходит принятый редакцией процесс допечатной подготовки, включающий редактирование, корректуру, верстку.

**8.** Рукописи, не удовлетворяющие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются.

**9.** Плата за опубликование рукописей **не взимается**.

**10.** С полным перечнем требований можно ознакомиться на сайте журнала [ast.tyuu.ru](http://ast.tyuu.ru).

## Manuscript preparation guidelines

1. The following documents must be attached to the submitted manuscript:
  - a cover letter from the author addressed to the editor-in-chief of the journal, confirming that the article has not been published anywhere else;
  - expert evaluation of the organization where the manuscript comes from on the possibility of open publication.
2. All manuscripts submitted to the journal are checked for plagiarism in the Antiplagiat system. Articles containing less than 75% of the original text are not accepted for publication in the journal (verification of the uniqueness of the text is carried out without taking into account metadata and bibliographic list).
3. Manuscripts that align with the journal's scope are sent to two reviewers and undergo double-blind peer review for expert evaluation. The reviewers are recognized experts in the subject matter of the reviewed material. The reviews are kept in the editorial office for 5 years.

### 4. Requirements for text.

**The file format** for the text is Microsoft Word (\*.docx). The file name must include the surname and initials of the author of the article (for example Ivanov\_AA.doc). Articles containing formulas, in addition to the word file, must be duplicated with a pdf file in order to avoid distorting the formulas that should be typed in MathType 4.0 Equation.

**The volume of the article** is at least 5 and no more than 15 pages (not including the reference list). Use 12 pt Times New Roman, single line spacing, paragraph 0.5 cm. Page margins: top 20 mm, bottom 20 mm, left 20 mm, right 20 mm.

**All graphic objects** must be submitted in separate files: one figure – one graphic format file. Raster images (photos) are submitted in JPG format with a resolution of at least 300 dpi. Each figure should be placed in the text and accompanied by a numbered figure caption. References to figures in the text are required.

**Tables** should be placed in the text of the article, they should have a numbering, heading and clearly marked columns, convenient and easy to read. References to tables in the text are required.

**The volume of illustrative materials** (tables and graphic materials) should not exceed 1/3 of the total volume of the manuscript.

**The list of references** (at least 20 sources) should contain links to current scientific works of national and international experts. Self-citations should not exceed 30 % of the total number of links.

The cited sources in the reference list are numbered in the order of their appearance in the text. All sources should be referenced in the text of the article in square brackets. The list should not contain unauthorized sources (SP, SNIPs, GOSTs, etc.) – links to them are given directly in the text of the article.

### 5. The manuscript of the article should include:

- UDC index;
- title of the article;
- initials and surname of the author;
- author's affiliation;
- abstract (130–180 words);
- keywords (5–7 words and (or) phrases);

- acknowledgements (information about grant support under which the research was carried out, and also gratitude to other scientists and/or enterprises who contributed to the implementation of the research);
- main text of the article;
- author contributions;
- conflict of interest;
- references (at least 20 sources);
- information about the authors: full name, position, academic degree, title, place of work, e-mail, ORCID.

**6.** The structure of the main body of the article should include the following sections, according to the IMRAD structure:

- **Introduction.** It includes the relevance of the research, literature review on the research topic, problem statement, formulation of the goal and objectives of the research.
- **Materials and methods / Methods.** This section includes a detailed description of the methods and schemes of experiments/observations that make it possible to reproduce their results using only the text of the article, as well as materials, devices, equipment, and other conditions for conducting experiments/observations.
- **Results and discussion.** It is recommended to present the results mainly in the form of tables, graphs, and other visual forms. This section includes the analysis of the results obtained, their interpretation, comparison with the results of other authors.
- **Conclusions.** Here the results of the research are summed up. Conclusions summarize the main scientific results of the article. Conclusions should logically correspond to the objectives set at the beginning of the article, contain brief summaries of the sections of the article without repeating the formulations given in them.

**7.** The manuscript, admitted for publication, goes through the prepress process adopted by the editors, including editing, proofreading, and layout.

**8.** Manuscripts that do not meet the listed requirements will not be accepted for consideration and will not be returned to authors.

**9.** There is no fee for the publication of manuscripts.

**10.** A complete list of requirements is available on the journal's website [ast.tyuiu.ru](http://ast.tyuiu.ru).



**Подписной индекс журнала «Архитектура, строительство, транспорт»  
в объединенном каталоге «Пресса России» 79619 ([www.pressa-rf.ru](http://www.pressa-rf.ru))**

