

DOI 10.31660/2782-232X-2025-1

ISSN 2782-232X (print)
ISSN 2713-0770 (online)

АСТ

АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛЬСТВО ТРАНСПОРТ

ARCHITECTURE • CONSTRUCTION • TRANSPORT



Том 5, № 1
2025

16+

АРХИТЕКТУРА СТРОИТЕЛЬСТВО ТРАНСПОРТ

Научно-информационный журнал
открытого доступа

Издается с 2021 года

ARCHITECTURE CONSTRUCTION TRANSPORT

Open access scientific and information
journal

The journal has been published since 2021

Том 5, № 1
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, осмысления 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 ученые степени.

2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки)
2.1.2 Основания и фундаменты, подземные сооружения (технические науки)
2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция, кондиционирование воздуха, газоснабжение и освещение (технические науки)
2.1.4 Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки)
2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)
2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)

2.1.9 Строительная механика (технические науки)
2.1.11 Теория и история архитектуры, реставрация и реконструкция историко-архитектурного наследия (архитектура, технические науки)
2.1.12 Архитектура зданий и сооружений. Творческие концепции архитектурной деятельности (архитектура, технические науки)
2.5.5 Технология и оборудование механической и физико-технической обработки (технические науки)
2.5.6 Технология машиностроения (технические науки)
2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта (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

Сайт журнала: <https://www.ast.tyuiu.ru>

Копирайт: © Архитектура, строительство, транспорт, 2025

Индексирование: журнал входит в перечень изданий, рекомендованных ВАК, индексируется в РИНЦ, международной базе ROAD

Подписной индекс: в каталоге агентства «Пресса России» – 79619 (www.ppressa-rf.ru)

Цена: свободная

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

Телефон редакции: +7 (3452) 28-37-50

E-mail: ast@tyuiu.ru

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

Верстка: Николюк С. А.

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

Дата выхода: 04.04.2025

Aims and Scope

The scientific and information journal "Architecture, Construction, Transport" ("Arkhitektura, 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)
2.1.2 Bases and foundations, underground structures (engineering sciences)
2.1.3 Heat supply, ventilation, air conditioning, gas supply, and illumination (engineering sciences)
2.1.4 Water supply and sanitation, construction systems for water resources protection (engineering sciences)
2.1.5 Construction materials and products (engineering sciences)
2.1.8 Design and construction of roads, subways, airfields, bridges, and transportation tunnels (engineering sciences)

2.1.9 Structural mechanics (engineering sciences)
2.1.11 Theory and history of architecture, restoration and reconstruction of historical and architectural heritage (architecture, engineering sciences)
2.1.12 Architecture of buildings and structures. Creative concepts of architectural activity (architecture, engineering sciences)
2.5.5 Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing (engineering sciences)
2.5.6 Mechanical engineering technology (engineering sciences)
2.9.5 Road transport operation (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.tyuiu.ru>

Copyright: © Architecture, Construction, Transport, 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 ROAD database

Subscription Index: in the Russian Press Agency catalog – 79619 (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@tyuiu.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: 04.04.2025

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 имени 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)

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

Грдиц 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)

Ковенский И. М., 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)

Мерданов Ш. М., д. т. н., профессор, Тюменский индустриальный университет, Тюмень (Российская Федерация)

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

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

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

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

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

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

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

Попок Н. Н., д. т. н., профессор, Полоцкий государственный университет имени 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)

Сепехри М., PhD, доцент, Технологический университет имени Шарифа, Тегеран (Иран)

Сладковски А. В., д. т. н., профессор, Силезский технический университет, Катовице (Республика Польша)

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, Дальневосточный федеральный 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)

Чжао В., PhD, профессор, Северо-Восточный университет, Шэньян (Китайская Народная Республика)

Якунин Н. Н., д. т. н., профессор, Оренбургский государственный университет, Оренбург (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. Borodinets, 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)

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

Ilya M. Kovenskiy, 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. Mamyan, 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)

Shakhbuba M. Merdanov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Industrial University of Tyumen, Tyumen (Russian Federation)

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)

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

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

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)

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

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

Mehran Sepehri, PhD, Associate Professor, Sharif University of Technology, Tehran (Iran)

Alexander V. Sladkovski, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Silesian University of Technology, Katowice (Republic of Poland)

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, Far Eastern Federal University, Vladivostok (Russian Federation)

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

Mikhail N. Chekardovski, 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)

Содержание

АРХИТЕКТУРА

О. А. Пастух

Устойчивое развитие городской среды на примере исторического центра Тулы 8

СТРОИТЕЛЬСТВО

**Я. А. Пронозин, И. В. Сугоняев, Е. П. Брагарь,
М. Д. Кайгородов**

Метод гидроразрыва для усиления грунтовых оснований под фундаментами зданий при горизонтальной проходке 21

**Д. С. Симонов, А. Ю. Морозов, К. Д. Коновалова,
Е. Л. Миськова**

Влияние периодического проветривания в учебном кабинете на качество воздуха и микроклимат 39

**А. Г. Тамразян, В. Р. Мешков, В. С. Геращенко,
А. С. Гришин**

Аппроксимация решения линейной задачи теплопроводности при одностороннем нагреве бетона в условиях стандартного температурного режима пожара 52

А. М. Фугаева, Е. И. Вялкова

Реагентная очистка бытовых сточных вод от ионов аммония в условиях арктической децентрализации поселений 67

Н. О. Борисов, О. Н. Столяров

Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа 81

С. И. Волынец

Свободные колебания тонкостенных магистральных нефтепроводов большого диаметра с учетом влияния продольной силы и массы протекающей жидкости 93

ТРАНСПОРТ

**Ю. Д. Ишкин, Н. С. Захаров, А. В. Рассохин,
Е. Г. Ишкина**

Влияние сезонности на формирование потребности в запасных частях автомобилей 102

**Р. В. Андронов, Е. Э. Леверенц, Д. А. Гензе,
Е. Н. Легостаева, В. С. Мотелика**

Анализ действующих методик по определению потоков насыщения на городских регулируемых пересечениях 112

Contents

Olga A. Pastukh

Sustainable urban development: the case of Tula's
historical center 8

**Yakov A. Pronozin , Ivan V. Sugonyaev, Elena P. Bragar,
Mikhail D. Kaigorodov**

Hydraulic fracturing method for strengthening soil
foundations under building foundations during horizontal
drilling 21

**Denis S. Simonov , Anton Yu. Morozov,
Kristina D. Konovalova, Elizaveta L. Miskova**

Effect of periodic ventilation in a classroom on air quality
and microclimate 39

**Ashot G. Tamrazyan, Vadim R. Meshkov,
Vitaly S. Gerashchenko, Andrey S. Grishin**

Approximating the solution of a linear heat transfer
problem for concrete subjected to one-sided heating under
standard fire conditions 52

Anastasiia M. Fugaeva, Elena I. Vialkova

Reagent-based treatment of domestic wastewater
for ammonium removal in decentralized Arctic settlements 67

Nikita O. Borisov, Oleg N. Stolyarov

Advantages of using textile-reinforced concrete
in cantilever structures 81

Sviatoslav I. Volynets

Free vibration of large-diameter, thin-walled oil pipelines
considering the influence of longitudinal force and mass
of flowing liquid 93

**Yuri D. Ishkin, Nikolai S. Zakharov, Alexander V. Rassokhin,
Elena G. Ishkina**

The impact of seasonality on spare part demand
for automobiles 102

**Roman V. Andronov, Evgeny E. Leverents, Dmitriy A. Genze,
Elena N. Legostaeva, Victoria S. Motelika**

Analysis of current methods for determining saturation flows
at urban controlled intersections 112

ARCHITECTURE

CONSTRUCTION

TRANSPORT

Научная статья / Original research article

УДК 719

<https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-8-20>

EDN: NOYFTY

2.1.11 Теория и история архитектуры, реставрация
и реконструкция историко-архитектурного
наследия (архитектура)

Устойчивое развитие городской среды на примере исторического центра Тулы

О. А. Пастух ✉

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет,
ул. 2-я Красноармейская, 4, Санкт-Петербург, 190005, Российская Федерация✉ gvolia@yandex.ru

Аннотация. Изучение современных аспектов развития городской среды исторических городов России лежит в основе многих научных исследований, посвященных вопросам сохранения историко-культурного ландшафта. Основная цель настоящего исследования заключалась в выявлении потенциала развития градостроительной и объемно-планировочной структуры центральных территорий исторических городов на примере Тулы. Основные проблемы, принципы и оптимальные способы реконструкции отдельных объектов, территорий и сложившейся на протяжении многих веков планировочной структуры исторического центра города исследовались на примере реализованного проекта комплексного благоустройства территории и создания современного общественного пространства – Казанской набережной, ул. Металлистов и Крестовоздвиженской площади, прилегающих к Тульскому кремлю. В ходе научного исследования было предложено оптимальное решение стратегического развития исторически сформировавшейся городской среды: реконструкция отдельных объектов культурного наследия и закрытых для общего доступа территорий, ранее не задействованных в общественно-культурной жизни города. Изменения городской среды зафиксированы на градостроительном и архитектурно-планировочном уровнях и проанализированы с учетом урбоэкологических и экономических факторов.

Ключевые слова: устойчивое развитие городской среды, историко-культурный городской ландшафт, реновация, реконструкция, общественное пространство, Казанская набережная, Тульский кремль

Для цитирования: Пастух О. А. Устойчивое развитие городской среды на примере исторического центра Тулы. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):8–20. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-8-20> EDN: NOYFTY

Sustainable urban development: the case of Tula's historical center

Olga A. Pastukh ✉

Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering,
4 2nd Krasnoarmeiskaya St., Saint Petersburg, 190005, Russian Federation✉ gvolia@yandex.ru

Abstract. The study of contemporary development aspects of the urban environment in Russian historical cities is central to many research efforts dedicated to preserving the historical and cultural landscape. The primary goal of this research was to identify the development potential within the urban planning and spatial structure of central areas in historical cities, using Tula as a case study. The main challenges, principles, and optimal methods for reconstructing individual objects, areas, and the historically established planning structure of the city center were examined through the realized project of comprehensive area improvement

and the creation of a modern public space, specifically the Kazanskaya Embankment, Metallistov Street, and Krestovozdvizhenskaya Square, adjacent to the Tula Kremlin. The research proposed an optimal strategic development solution for the historically formed urban environment: the reconstruction of selected cultural heritage objects and areas closed to public access, which had not previously been integrated into the city's social and cultural life. The changes to the urban environment were identified at both the urban planning and architectural design levels and analyzed considering urban-ecological and economic factors.

Keywords: sustainable urban development, historical and cultural urban landscape, renovation, reconstruction, public space, Kazanskaya embankment, Tula Kremlin

For citation: Pastukh O. A. Sustainable urban development: the case of Tula's historical center. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):8–20. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-8-20>



1. Введение / Introduction

Исторические и культурные ландшафты – это большое хранилище экономической, социальной и культурной информации о человеческих цивилизациях, отражающее эволюцию и культурную трансформацию среды жизнедеятельности исторических городов. Процесс урбанизации от этапа стремительного прогресса перешел к новой стадии стабильного и качественного развития. На новом этапе жизнедеятельности исторические города сталкиваются с различными задачами и вызовами при решении вопросов устойчивого развития исторических и культурных ландшафтов. Сохранение объектов культурного наследия – зримого воплощения нашей национальной идентичности и неразрывности связи поколений России – относится к приоритетным задачам современного развития российского общества [1, 2].

Средовой подход, используемый при создании или реконструкции городской архитектурной застройки, можно представить как совокупность всех известных методов исследования и проектирования, относящихся к жизни города и горожан одновременно [3]. Влияние архитектурной среды на поведение человека является одним из ключевых вопросов взаимодействия человека и среды. В основе такого взаимодействия лежит социальная коммуникация людей, общение в процессе реализации различных сценариев освоения городского пространства разными социальными и возрастными группами общества [3, 6]. Растущие запросы населения способствуют активному развитию городской среды. Важную роль играют современные общественные пространства. Их основными параметрами являются психологический комфорт места, социальная интеграция и культурная идентификация [3, 7].

В настоящее время в крупнейших городах Российской Федерации, таких как Новосибирск, Екатеринбург, Санкт-Петербург и Москва, ввиду их быстрого экономического и территориального роста осуществляется перенос промышленных производств за пределы основной жилой и деловой частей города, новые городские территории осваиваются в соответствии с новым актуальным функциональным зонированием [3, 5].

Например, в 2013 г. был принят проект планировки и реорганизации бывшей производственной зоны «ЗИЛ» в Москве, согласно которому на поделенной на девять частей территории запланировано строительство жилых микрорайонов, делового центра, филиала Государственного Эрмитажа, парков, спортивного кластера и т. д. Связанные доступной транспортной инфраструктурой социальные и коммерческие объекты должны обеспечить рабочими местами более 45 тыс. жителей столицы.

Еще один пример – дизайн-завод «Флакон» в Москве. В XIX в. на данной локации был основан хрустально-стеклянный завод по производству флаконов для духов. В 1970-х производство пошло на спад, и в начале 2000-х завод закрылся. В 2009 г. состоялось открытие нового пространства – дизайн-завода «Флакон». Это место стало творческим пространством, где арендаторам дали возможность

организовать помещения по своим дизайн-проектам. На данный момент там находятся различные креативные агентства, коворкинг-центры, архитектурные мастерские и т. д. [3, 4].

Огромным потенциалом развития городского пространства за счет прибрежных территорий, включая намывные и портовые, обладает Санкт-Петербург [3–5]. Активно застраиваются освобождаемые от промышленных объектов территории исторического центра Северной столицы, так называемого Серого пояса Санкт-Петербурга. Проекты реновации набережных и прибрежных территорий реализуются в различных районах города. Разрабатываются флагманские конкурсные проекты, а также студенческие проекты-концепции для набережных больших и малых рек города: Охты, Карповки, Оккервиля и многих других. Выделяют три направления интенсивного развития зон отдыха среди крупных прибрежных городских территорий: западные береговые линии Васильевского и Крестовского островов, а также участок от Сестрорецка до Зеленогорска. Новейшая история острова Новая Голландия началась в 2011 г., когда он стал частью проекта «Новая Голландия: культурная урбанизация». В рамках этого проекта были проведены работы по преобразованию территории, было решено сохранить исторические пространства и создать на острове новый городской парк с современной инфраструктурой и богатой культурной составляющей [6].

В условиях инновационного развития регионов природные водные ресурсы имеют градостроительное значение, способствуют созданию системы благоустроенных территорий общего пользования, объединяющих наиболее значимые городские объекты, играют важную роль в реновации портовых и прибрежных промышленных территорий [3]. При определении подходящего метода реставрации общественного объекта решающее значение имеет оценка его исторической и архитектурной ценности. Больше возможностей для творческого использования, совмещения старого и нового у объектов, которые обладают меньшим историческим значением [5, 6].

Вопросы комплексного подхода к реновации исторического наследия на планировочном и объектном уровнях (от общественных пространств и набережной до отдельных памятников исторического и культурного наследия малых и средних городов с учетом социокультурных потребностей современного общества и принципов урбозкологии и когнитивной урбанистики) рассматривались многими российским и зарубежными исследователями. Среди них – М. В. Шубенков, Г. В. Короленко, А. В. Крашенинников, М. В. Перькова, Е. В. Баклаженко, К. К. Арынов, З. Г. Мамян, В. Р. Крогиус и другие.

Широкий интерес научного сообщества к проблемам реновации исторических городов обусловлен тем, что они характерны для городов разных стран. Это, в частности, подтвердила Первая международная конференция по устойчивому развитию и сохранению историко-культурного городского ландшафта, организованная в рамках сотрудничества университетов стран-участниц ОПОП¹. В конференции, которая прошла в Чжэнчжоу (Китай), приняли участие ученые из России, Саудовской Аравии, Новой Зеландии, Египта, Ирана и стран Средней Азии. Во время работы конференции были подробно рассмотрены вопросы сохранения и использования исторических памятников в контексте глобальных изменений климата, цифровизации, новых отношений между городом и деревней и обновления городских сообществ в современную эпоху.

В ходе пленарного заседания автору удалось провести апробацию исследования, в рамках которого были рассмотрены архитектурно-конструктивные, градостроительные и урбозкологические особенности устойчивого развития и сохранения городской среды промышленного наследия горо-

¹ Инициативу по развитию экономических коридоров в Евразии «Один пояс – один путь» выдвинул в сентябре 2013 г. председатель КНР Си Цзиньпин. Соглашения о сотрудничестве с Китаем в рамках программы подписали более 150 стран.

да Тулы до периода интенсивной индустриализации. Во время первых пятилеток СССР этот исторический город стал одним из крупнейших промышленных центров региона.

Актуальность выбранной тематики обоснована поиском оптимальных решений по созданию и развитию комфортной городской среды, отвечающей социокультурным запросам стремительно меняющегося и развивающегося общества XXI в. Исследования в области устойчивого развития городской среды, предусматривающие сохранение или частичное воссоздание историко-культурного ландшафта исторических русских городов, позволяют изучить уже реализованные комплексные проекты реновации с разработанным современным дизайн-кодом общественных и рекреационных городских пространств [7]. Анализ практик позволяет отобрать наиболее эффективные решения, помогает избежать ошибок и повысить качество выполняемых проектов.

Цель настоящего исследования заключалась в выявлении потенциала развития градостроительной и объемно-планировочной структуры центральных территорий исторических городов на примере города Тулы, одного из областных центров Центрального Федерального округа Российской Федерации.

Основные задачи:

- анализ основных принципов устойчивого развития исторического города в условиях сохранения и развития природного ландшафта и культурного наследия;
- изучение архитектурно-конструктивных, градостроительных и урбоэкологических особенностей устойчивого развития городских территорий;
- определение условий сохранения историко-культурного городского ландшафта в ходе реновации промышленного наследия городов.

Благодаря национальным программам, направленным на поддержку и развитие малых и средних городов в Российской Федерации, прикладываются усилия для создания комфортной среды проживания, охраны культурного наследия и сохранения национальной идентичности [6, 7]. За последние два десятилетия в Туле было реализовано значительное количество подобных проектов. Центральное положение города на европейской территории России в непосредственной близости от Москвы определило развитие его объемно-планировочной структуры вдоль основных торговых трактов. Для Тулы, как и для большинства исторических русских городов, характерно наличие конфликта транспортной и туристической инфраструктуры, напряженности во взаимодействии разных сфер жизнедеятельности горожан именно в центральных районах. Для решения сложившихся проблем необходимо проведение грамотной градостроительной политики в отношении этих территорий. Исторические центры городов должны иметь актуальное для общества функциональное назначение, предусматривающее новые рабочие места, современные общественные и рекреационные пространства, деловые и выставочные площадки. При этом должны быть сохранены сложившийся городской ландшафт и культурное наследие различных периодов исторического развития городской среды [7].

2. Методы / Methods

В настоящем исследовании был проведен системный анализ трансформации среды жизнедеятельности одного из центров индустриального развития Центрального Федерального округа – города Тулы (20–30-е гг. XX в.). Были теоретически обоснованы закономерности эволюции и устойчивого развития городской среды, рассмотрены вопросы сохранения историко-культурного городского ландшафта в наши дни.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Город Тула исторически известен как центр оружейного производства России. Однако с распадом Советского Союза и в связи с изменением промышленных потребностей многие предприятия

закрылись, а используемые ранее заводами территории остались незадействованными. Архитектурно-пространственная и объемно-планировочная специфика исторического центра Тулы обусловлена его низинным расположением в пойме реки Упы. Хотя все основные магистрали, вдоль которых происходило развитие, берут начало от кремля, сердце города остается спрятанным в низине [7, 10].

В середине 1830-х гг. Тульским губернским правлением был издан указ об устройстве сада вокруг кремля на месте уничтоженного пожаром сенного рынка. Сад, окружающий Тульский кремль с трех сторон, был открыт в июле 1837 г. и состоял из Верхнего (от Башни Пятницких ворот до Ивановской башни) и Нижнего (протянулся вдоль берега Упы от Ивановской башни до башни Водяных ворот) сада (рис. 1). После того как будущий император Александр II проездом посетил Кремлевский сад, его стали называть еще и Александровским. Во второй половине XIX в. сад начал приходить в запустение, однако уже в начале XX в. общественная жизнь в нем закипела с новой силой. В Кремлевском саду устраивались пчеловодческие и птицеводческие выставки, работали оранжерея и ботанический сад, а также синаматогграф, ресторан и прочие увеселительные заведения [8].

В 1920–1930-х гг. территория Кремлевского сада и Казанской набережной утратила свою социально-общественную функцию. С середины 1920-х гг. после закрытия и сноса Казанского храма и прекращения торговли на Казанской площади бывшая набережная постепенно превращалась в пустырь. Кремлевский сад еще продолжал работать [8].

С середины 1920-х гг. он носил имя советского партийного и профсоюзного деятеля М. П. Томского, с начала 1930-х гг. назывался садом ТОЗ (Тульского оружейного завода).

К концу первой трети XX в. Кремлевский сад облагородили в духе времени: разместили парашютную вышку, построили концертный павильон, читальню, эстраду, кинотеатр, ресторан, танцплощадку и обустроили зооуголок. Также в саду находился летний клуб «Красный оружейник». В 1940-х гг. все эти заведения прекратили свою работу [8].

Период интенсивной индустриализации (1928–1940 гг.) оказал существенное влияние на развитие садово-паркового хозяйства Тулы. На начало первой пятилетки в городе невыразимо мала была зеленая зона. При 2,5 тыс. га селитебной территории площадь зеленых насаждений составляла всего 100 га, это 4 % при норме 25 %. Наиболее значимыми зелеными территориями в то время были Кремлевский сад и Петровский парк [8]. В годы Великой Отечественной войны вместе с бывшей Казанской набережной территория Нижнего кремлевского сада была передана Тульскому оружейному заводу для расширения военного производства. Территорию Нижнего сада полностью занял Оружейный завод, для горожан доступ к нему был закрыт [8].

а)



b)



Рис. 1. Тульский кремлевский сад на открытках начала XX в.:
а) беседка Нижнего сада; б) Театральная аллея Верхнего сада [9]

Fig. 1. Tula Kremlin Garden on early 20th century postcards: a) Lower Garden gazebo; b) Upper Garden Theatre alley [9]

В 1990–2015 гг. предпринимались шаги для возрождения Верхнего кремлевского сада. Он был благоустроен, на территории появились детский городок, монументы, памятные знаки и арт-объекты.

Вопрос о будущем Тульского кремля и прилегающих территорий с новой силой зазвучал в начале XXI в. В рамках государственной программы было запланировано вернуть историческую целостность древнему ансамблю: восстановить религиозную функцию соборов, расположенных на его территории; воссоздать полностью утраченную колокольню; отреставрировать стены и башни кремля и кирпичных корпусов первой тульской электростанции, выстроенной на территории Кремля в начале XX в. и не являющейся (в отличие от стен и башен кремля) объектом охраны культурного наследия [10].

В XXI в. исторический центр Тулы качественно преобразился, начался процесс активной реализации планов по созданию комфортной городской среды, новых общественных пространств, в том числе и на бывших промышленных территориях, заброшенных в прошлом и закрытых для общественного доступа.

В декабре 2016 г. по инициативе бывшего губернатора Тульской области А. Г. Дюмина началась работа по созданию комфортного и современного общественного пространства в исторической части города, итогом которой стал представленный широкой публике уникальный для Тулы урбанистический проект набережной общей площадью 21 га, расположенной вокруг Тульского кремля. Разрабатывал проект творческий коллектив архитекторов московского бюро Wowhaus (руководитель О. Шапиро) в тесном сотрудничестве с правительством региона и администрацией города Тулы. Проект комплексного благоустройства охватил территорию почти в три раза больше площади самого кремлевского музейного комплекса и включал в себя отдельные локации: набережную старого русла реки Упы, ул. Металлистов и ее исторический квартал, Крестовоздвиженскую площадь, часть ул. Советской, сквер им. С. И. Мосина (рис. 2).

Казанская набережная у стен Тульского кремля на протяжении нескольких веков была закрытой заводской зоной, которая в начале XXI в. представляла собой практически заброшенную территорию, черную дыру в самом центре города. Реализация проекта комплексного благоустройства и

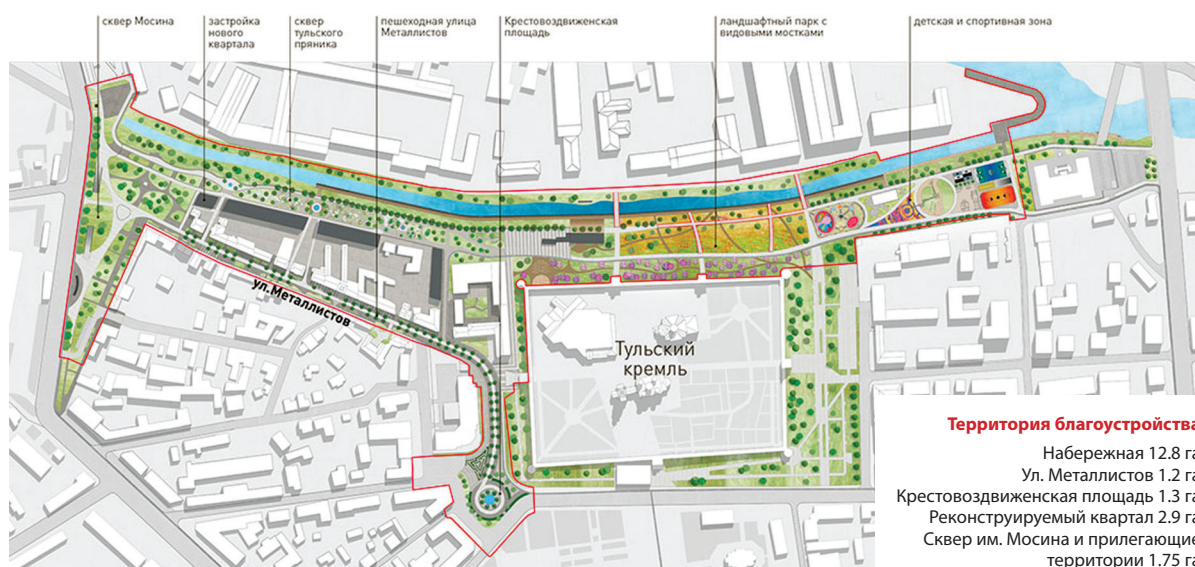


Рис. 2. Проект комплексного благоустройства территории вокруг Тульского кремля
(иллюстрация из проекта архитектурного бюро Wowhaus, О. Шапиро, 2017 г.)

Fig. 2. Integrated landscaping project for the area surrounding the Tula Kremlin
(illustration from the Wowhaus architectural bureau project, O. Shapiro, 2017)

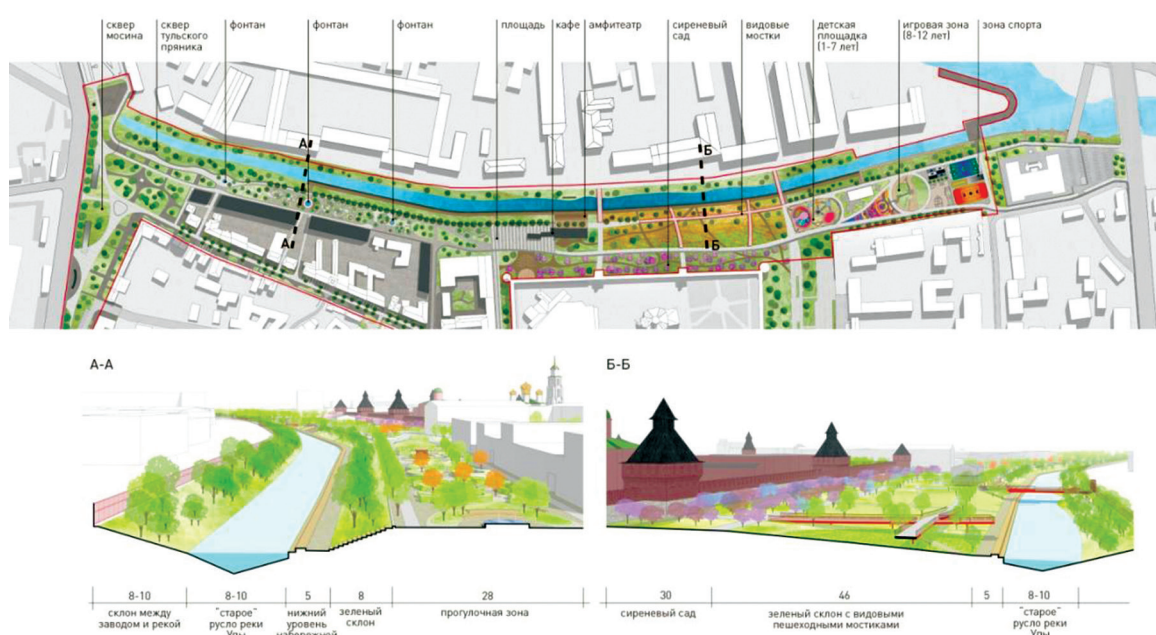


Рис. 3. План и видовые коридоры благоустройства Казанской набережной, видовые разрезы территории (иллюстрация из проекта архитектурного бюро Wowhaus, О. Шапиро, 2017 г.)

Fig. 3. Kazan embankment landscaping plan and view corridors, site perspective sections (illustration from the Wowhaus architectural bureau project, O. Shapiro, 2017)

обновления территории вокруг Тульского кремля началась в 2018 г. Перед проектировщиками стояли непростые задачи:

- регенерировать историческую часть города;
- максимально раскрыть потенциал городской набережной;
- найти якорные функции для окружающего ее центра;
- предложить актуальные сценарии использования городского пространства (рис. 3).

Для этого необходимо было пересмотреть стратегию использования и продумать различные сценарии функционирования территории, размер которой в три раза превышает размеры Тульского кремля и которая не может существовать отдельно от остального города. Была продумана система пешеходных маршрутов, связавшая несколько смысловых центров – музейный квартал, пешеходную улицу с магазинами и кафе, а также территорию кремля, прогулочную зону вдоль старицы реки Упы (старого русла, превратившегося в ручеек). Благодаря дополнительным входам на территорию Тульского кремля с Казанской набережной, Кремлевского сада и со стороны Крестовоздвиженской площади (рис. 4b, 6, 7b и 7d) горожанам и гостям города стало доступно максимальное количество достопримечательностей исторического центра.

Важную роль в проекте играло благоустройство Казанской набережной вдоль реки Упы площадью 12 га. Долгое время она была недоступна для горожан, так как относилась к территории вспомогательного хозяйственного назначения Тульского оружейного завода. Чтобы набережная стала точкой притяжения горожан и туристов, на первом этапе потребовалось провести хозяйственные и мелиорационные работы на русле старицы Упы. В результате проделанной работы было создано комфортное и благоустроенное рекреационное пространство с ландшафтным парком на берегах, спусками к воде, детскими и спортивными площадками, пунктами общественного питания и безопасности. Объемно-планировочным акцентом общественного рекреационного пространства набережной стали красные пешеходные мостики общей протяженностью 270 м, с которых открывается вид на город, Тульский кремль и Упу с необычного ракурса. Для создания ландшафтного парка и обще-

го озеленения была разработана индивидуальная программа посадок. Новая во всех смыслах Казанская набережная у стен Тульского кремля стала общедоступной и привлекательной рекреационной зоной общегородского значения, любимым местом отдыха, прогулок, проведения городских мероприятий и сезонных ярмарок, творческих вечеров, выставок (рис. 4) [11].

Основная идея проекта комплексного благоустройства прилегающей к Тульскому кремлю Крестовоздвиженской площади, в советское время носившей название площади Челюскинцев (рис. 5), заключалась в том, чтобы сделать из этой территории пешеходную зону, открытое фойе музейного комплекса Тульского кремля и музейного квартала на ул. Металлистов (рис. 6).

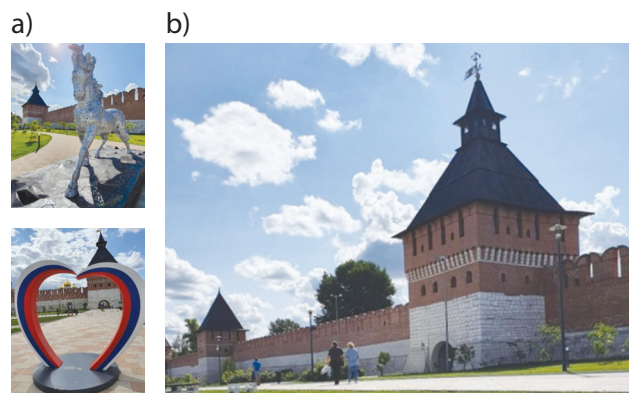


Рис. 4. Казанская набережная у стен Тульского кремля, 2021 г.: а) элементы малых архитектурных форм; б) входные ворота в башнях (фото автора)
Fig. 4. The Kazan embankment at the Tula Kremlin walls, 2021: a) details of small-scale architecture; b) tower entrance gates (author's photo)



Рис. 5. Ансамбль площади Челюскинцев (в настоящее время – Крестовоздвиженской площади): здание фабрики-кухни, школа ФЗУ № 1, угловая башня Кремля, по центру монумент. Фото 1960-х гг. [9]
Fig. 5. Ensemble of Chelyuskintsev Square (currently – Krestovozdvizhenskaya Square): the factory-kitchen building, factory training school No. 1, the corner tower of the Kremlin, a monument in the center. Photo from the 1960s. [9]

Проектом комплексного благоустройства территорий, прилегающих к Тульскому кремлю, также предусмотрено снижение транспортной нагрузки и преобразование всей территории в пешеходную зону, создание так называемого музейного квартала (рис. 7). Чтобы открыть центральную часть города для пешеходов, была изменена схема транспортного движения: потоки автомобилей с ул. Металлистов были направлены на близлежащие улицы. Обоснованность этого решения подтверждает исследование, показавшее, что в ближайшие годы благодаря появлению нового моста количество транспорта в центре будет снижаться. Пешеходная доступность всех объектов проекта, в том числе и для маломобильных групп населения, сделала исторический центр Тулы более удобным и привлекательным [12, 13].

Музейный квартал на ул. Металлистов – одна из самых популярных локаций обновленного исторического центра Тулы, передающая атмосферу старинного русского города. Основу квартала составляют представительства государственных музеев Тулы и Тульской области. Многие расположенные здесь здания являются объектами культурного значения федерального и регионального уровней, они были полностью восстановлены или частично отреставрированы. На первых этажах зданий Музейного



квартала разместились помещения общественного назначения с торговой, выставочной и образовательной функциями, а также гостиницы и деловые центры (рис. 7b). Такое решение позволило создать дополнительные рабочие места и позитивно отразилось на городской экономике [14, 15]. Внутреннее пространство благоустроенных дворов, объединивших пространство ул. Металлистов с Казанской набережной, работают как дополнительные выставочные, событийные, образовательные площадки (рис. 7c). Музейный квартал сохраняет историческую память места, а уникальный дизайн-код делает его привлекательным не только для потребителей, но и для инвесторов, среднего и малого бизнеса.

В результате реализации проекта комплексного благоустройства территории одна из старейших улиц города образца XVIII в., находившаяся не в лучшем состоянии, стала соответствовать историческому образу улицы начала XIX в. (рис. 8). Была проведена реконструкция отдельных зданий, являющихся объектами культурного наследия, обновлена вся коммунальная и инженерная инфраструктура. Новый туристический рекреационный центр Тулы стал соответствовать современным требованиям комфорта и безопасности.



Рис. 8. Улица Металлистов: а) проектное предложение архитектурного бюро Wowhaus, О. Шапиро, 2017 г.; б, в) панорамный вид, 2024 г. (фото автора)

Fig. 8. Metallistov Street: a) design proposal by the Wowhaus architectural bureau, O. Shapiro, 2017; b, c) panoramic view, 2024 (author's photos)

Устойчивое развитие городской среды и сохранение историко-культурного городского ландшафта являются неотъемлемой частью градостроительных преобразований, необходимость которых обусловлена экономическими реалиями и состоянием объемно-планировочного каркаса города. Новые территории, совмещающие многослойные общественные и деловые зоны, жилые единицы, учебно-просветительские учреждения, отвечают запросам современного общества [13]. Реконструкция исторических зон в настоящее время осуществляется преимущественно по индивидуальным проектам, разрабатываемым на основе планов развития городских территорий и в строгом соответствии с планами функционального зонирования и разработки общего мастер-плана [13]. Центры природного и архитектурного значения, функциональное зонирование территорий и создание современного кластера, подразумевающее бережное отношение к историко-культурному городскому ландшафту, – все это играет особую роль в развитии туризма. Положительный эффект комплексного подхода к развитию исторической территории можно проследить на примере многих зарубежных городов [14–17].

Проект комплексного благоустройства исторического центра Тулы стал результатом совместной работы администрации города, областных властей, общественных организаций по благоустройству, архитекторов и проектировщиков, а также всех неравнодушных к судьбе города граждан и вошел в федеральную целевую программу «Развитие малых городов России (2014–2020 гг.)» [10]. Проект организации нового общественного пространства вокруг кремля стал закономерным продолжением реконструкции самого Тульского кремля (2012–2016 гг.). История развития данной территории отражала важные вехи исторического центра города, не раз перестраивалась и видоизменялась. Благодаря реализации проекта уменьшилась транспортная нагрузка на центр города, открылось большое пространство вдоль стен кремля, было облагорожено русло реки Упы, создан

музейный квартал, обустроена пешеходная территория ул. Металлистов, стала доступна для прогулок набережная вдоль стен кремля.

Обновленное и благоустроенное городское пространство, открытие которого состоялось в 2018 г., является примером не только бережного отношения к историко-культурному наследию городского ландшафта, но и соответствует основным принципам устойчивого развития городской среды с точки зрения функциональности и безопасности. Это стало возможным благодаря современным инженерным решениям и строительным материалам, а также уникальному дизайн-коду места [18].

Данная территория стала точкой притяжения жителей и гостей города. Фестивали и ярмарки проводятся в данной локации в круглогодичном формате. В теплое время года работают концертные площадки, летний кинотеатр, прокат велосипедов и лодок, в холодное – ледяные горки, каток в русле реки Упы. Для безопасного функционирования площадок и проведения в любое время суток различных мероприятий построено 19 беседок и павильонов, установлены камеры видеонаблюдения, 385 отдельных опор освещения, подсвечены лавочки, мостики, дорожки. Развитие исторического центра города Тулы дало импульс развитию всего города в целом.

4. Заключение / Conclusions

Проведенное исследование реализованных проектов реновации исторического центра и отдельных объектов промышленного наследия на примере города Тулы позволило сделать ряд выводов:

1. Центральные территории исторических городов обладают огромным потенциалом развития градостроительной и объемно-планировочной структуры, реновация и ревитализация бывших промышленных объектов и их территорий дает городам новый импульс для социально-экономического роста.
2. Комплексный подход к реновации территорий и объектов культурного наследия, включающий применение современных конструктивных и инженерно-технических решений наряду с бережным отношением к памяти и атмосфере исторического места, позволяет создать современные локации с актуальным функциональным наполнением и уникальным дизайн-кодом.
3. Реализация подобных проектов положительно влияет на транспортную и пешеходную доступность исторических объектов, а также культурную, туристическую и общественно-деловую жизнедеятельность центральных районов.



Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Токунова Г. Ф., Харитонович А. В. Ключевые аспекты применения ресурсного подхода в целях управления развитием. *Экономика: вчера, сегодня, завтра*. 2019;9(10A):544–552. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42649907>.
2. *Город как социокультурное явление исторического процесса*. Москва: Наука; 1995. URL: https://www.glazyshev.ru/books/sborniki/1995_gorod_kak_sociokult_yavlenie/1995_gorod_kak_sociokult_yavlenie.pdf.
3. Dorian L. *Ecological Buildings: New Strategies for Sustainable Architecture*. Berlin: Braun Publishing AG; 2021.
4. Баклаженко Е. В., Перькова М. В. Вопросы формирования природно-экологического каркаса урбанизированных территорий малых городов. В сб.: *Неделя науки ИСИ, Санкт-Петербург, 04–10 апреля 2022 года*. Ч. 3. Санкт-Петербург: Политех-Пресс; 2022. С. 102–104. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48776410>.
5. Крогиус В. Р. *Исторические города России как феномен ее культурного наследия*. Москва: Прогресс-Традиция; 2009.
6. Крашенинников А. В., Перькова М. В. Градостроительные перспективы. *Архитектура и строительство России*. 2022;(3):4–7. URL: <https://asrmag.ru/3-2022/ASR3-22Krashennnikov-Perkova.pdf>.
7. Короленко Г. В. Градостроительные приемы реализации потенциала жилой среды. В сб.: *Реабилитация жилого пространства горожанина: сборник материалов XX международной научно-практической конференции им. В. Татлина*. Пенза: ПГУАС; 2024. С. 303–305.

8. Пастух О. А. Развитие паркового хозяйства в Туле в первой половине XX века. *Региональные архитектурно-художественные школы*. 2016;(1):338–344. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27215875>.
9. Тенцер М. Б. *Тула на старой открытке: альбом*. Тула: Борус-Принт; 2012.
10. Пастух О. А. Проектные концепции и реалии развития исторической территории Тулы. *Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета*. 2015;(4):47–55. URL: <https://elibrary.ru/uxwixx>.
11. Крашенинников А. В. Социально-пространственная структура пешеходного пространства. *Архитектура и современные информационные технологии*. 2012;(4):4. URL: <https://marhi.ru/AMIT/2012/4kvart12/krashennnikov/abstract.php>.
12. Шубенков М. В. Человек и пространство. *Архитектура и современные информационные технологии*. 2009;(2):2. URL: <https://marhi.ru/AMIT/2009/2kvart09/Shubenkov/Article.php>.
13. Аршакян А. А., Мамян З. Г. Задачи градостроительных трансформаций функциональных зон. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2021;(2):17–23. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2021-2-17-23>
14. Farahat B. I., Osman K. A. Toward a new vision to design a museum in historical places. *HBRC Journal*. 2018;(14):66–78. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.01.004>
15. Гендель Э. М. *Инженерные работы при реставрации памятников архитектуры*. Москва: Стройиздат; 1980.
16. Зинабдин Г. Н., Арынов К. К. Проблемы формирования архитектурно-туристического кластера в Восточном Казахстане. В сб.: *Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации, Пенза, 5 марта 2021 года*. Пенза: Наука и просвещение; 2021. С. 200–203. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44817828_17267129.pdf.
17. Мамян З. Г., Халатян Л. Д. К вопросу об организации территорий социального общения в планировочной структуре города Еревана. В сб.: *Архитектура и архитектурная среда: вопросы исторического и современного развития, Тюмень, 05 июня 2020 года. Т. I*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2020. С. 290–295.
18. Пастух О. А., Елистратов В. Н., Есауленко И. В. Архитектурные аспекты и конструктивные решения формирования и устойчивого развития дизайна городской среды. *Системные технологии*. 2024;(2):162–170. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68050391>.

References

1. Tokunova G. F., Kharitonovich A. V. Key aspects of resource-based approach using for development management. *Economics: Yesterday, Today and Tomorrow*. 2019;9(10A):544–552. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=42649907>.
2. *The city as a socio-cultural phenomenon of the historical process*. Moscow: Nauka; 1995. (In Russ.) URL: https://www.glazychyev.ru/books/sborniki/1995_gorod_kak_sociokult_yavlenie/1995_gorod_kak_sociokult_yavlenie.pdf.
3. Dorian L. *Ecological Buildings: New Strategies for Sustainable Architecture*. Berlin: Braun Publishing AG; 2021.
4. Baklazhenko E. V., Per'kova M. V. Issues of formation of natural-ecological framework of urbanized territories of small towns. In: *Nedelya nauki ISI, St. Petersburg, April 04-10, 2022. P. 3*. St. Petersburg: Politekh-Press; 2022. P. 102–104. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=48776410>.
5. Krogius V. R. *Historic cities of Russia as a phenomenon of its cultural heritage*. Moscow: Progress-Traditsiya; 2009. (In Russ.)
6. Krashennnikov A. V., Perkova M. V. Urban planning prospects of low-rise buildings. *Architecture and Construction of Russia*. 2022;(3):4–7. (In Russ.) URL: <https://asrmag.ru/3-2022/ASR3-22Krashennnikov-Perkova.pdf>.
7. Korolenko G. V. Urban planning techniques for realizing the potential of residential environment. In: *Rehabilitation of townsman's dwelling space: Collection of scientific articles XX International scientific and practical conference of V. Tatlin*. Penza: PSUAC; 2024. P. 303–305. (In Russ.)
8. Pastukh O. A. Development of park economy in Tula in the first half of the twentieth century. *Regional architectural and art schools*. 2016;(1):338–344 (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=27215875>.
9. Tentser M. B. *Tula on an old postcard: an album*. Tula: Borus-Print; 2012. (In Russ.)
10. Pastukh O. A. Design concept and realities of development of the historic site of Tula. *News of the Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2015;(4):47–55. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/uxwixx>.
11. Krashennnikov A. V. Socio-spatial structure of pedestrian space. *Architecture and Modern Information Technologies*. 2012;(4):4. (In Russ.) URL: <https://marhi.ru/AMIT/2012/4kvart12/krashennnikov/abstract.php>.
12. Shubenkov M. V. Man and space. *Architecture and modern information technologies*. 2009;(2):2. (In Russ.) URL: <https://marhi.ru/AMIT/2009/2kvart09/Shubenkov/Article.php>.
13. Arshakyan A. A., Mamyan Z. G. Tasks of urban planning transformations of functional zones. *Architecture, Construction, Transport*. 2021;(2):17–23. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2021-2-17-23>
14. Farahat B. I., Osman K. A. Toward a new vision to design a museum in historical places. *HBRC Journal*. 2018;(14):66–78. <https://doi.org/10.1016/j.hbrj.2016.01.004>

15. Gendel' E. M. *Engineering works during restoration of architectural monuments*. Moscow: Stroizdat; 1980. (In Russ.)
16. Zinabdin G. N., Arynov K. K. Problems of forming an architectural and tourist cluster in East Kazakhstan. In: *Sovremennye nauchnye issledovaniya: aktual'nye voprosy, dostizheniya i innovatsii, Penza, 5 March 2021*. Penza: Nauka i prosveshchenie; 2021. P. 200–203. (In Russ.) URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_44817828_17267129.pdf.
17. Mamyan Z. G., Khalatyan L. D. On the organization of social communication territories in the planning structure of Yerevan city. В сб.: *Arkhitectura i arkhitekturnaya sreda: voprosy istoricheskogo i sovremennogo razvitiya, Tyumen, 05 June 2020. Vol. I*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2020. P. 290–295. (In Russ.)
18. Pastukh O. A., Elistratov V. N., Esaulenko I. V. Architectural aspects and constructive solutions for the formation and sustainable development of urban environment design. *System Technologies*. 2024;(2):162–170. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68050391>.



Информация об авторе

Пастух Ольга Александровна, кандидат архитектуры, доцент, заместитель декана строительного факультета по научной работе, доцент кафедры архитектурно-строительных конструкций, Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, Санкт-Петербург, Российская Федерация, gvolia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8946-8547>

Information about the author

Olga A. Pastukh, Cand. Sci. (Architecture), Associate Professor, Deputy Dean of the Faculty of Civil Engineering for Scientific Work, Associate Professor in the Department of Architectural and Engineering Constructions, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation, gvolia@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8946-8547>

Получена 28 октября 2024 г., одобрена 03 декабря 2025 г., принята к публикации 03 марта 2025 г.
Received 28 October 2024, Approved 03 December 2025, Accepted for publication 03 March 2025



Метод гидроразрыва для усиления грунтовых оснований под фундаментами зданий при горизонтальной проходке

Я. А. Пронозин ✉, И. В. Сугоняев, Е. П. Брагарь, М. Д. Кайгородов

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

Российская Федерация

✉ geofond.tgasu@gmail.com



Аннотация. Проанализированы методы гидравлического разрыва пласта при горизонтально ориентированных скважинах, а также способы усиления грунтовых оснований под фундаментами существующих зданий с применением высоконапорной инъекции (в том числе выполненных по манжетной технологии). Рассмотрено поведение гидроразрыва в массиве грунта, которое, в свою очередь, также зависит от давления гидроразрыва и напряженно-деформированного состояния грунта. Представлена сводная таблица с формулами отечественных и зарубежных ученых по определению давления, при котором происходит разрыв грунта. На основании выявленных преимуществ и недостатков рассмотренных методов закрепления грунтовых оснований предложен альтернативный способ – усиление оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке. Суть технологии заключается в устройстве (с применением технологий, позволяющих производить горизонтальное бурение бестраншейным способом) горизонтальных полиэтиленовых (колтюбинговых) труб под фундаментом здания либо вдоль него, через которые по манжетной технологии в грунт под давлением, равным давлению разрыва грунта, будет поступать твердеющий раствор, образуя при этом гидравлические разрывы в грунте и тем самым увеличивая его механические характеристики.

Ключевые слова: горизонтально ориентированная цементация, высоконапорная инъекция, усиление грунтового основания, гидроразрыв пласта, манжетная технология, обзор

Для цитирования: Пронозин Я. А., Сугоняев И. В., Брагарь Е. П., Кайгородов М. Д. Метод гидроразрыва для усиления грунтовых оснований под фундаментами зданий при горизонтальной проходке. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):21–38. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-21-38> EDN: MOWBVS

Hydraulic fracturing method for strengthening soil foundations under building foundations during horizontal drilling

Yakov A. Pronozin ✉, Ivan V. Sugonyaev, Elena P. Bragar, Mikhail D. Kaigorodov

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

✉ geofond.tgasu@gmail.com



Abstract. The study analyzed the methods of hydraulic fracturing in horizontally oriented wells, along with techniques for strengthening soil foundations under existing building foundations using high-pressure injection (including those performed using sleeve grouting technology). The behavior of hydraulic fracturing in the soil mass was considered, which, in turn, also depends on the hydraulic fracturing pressure and the

stress-strain state of the soil. A summary table was presented with formulas from domestic and foreign scientists for determining the pressure at which soil fracturing occurs. Based on the identified advantages and disadvantages of the considered soil foundation reinforcement methods, the authors proposed an alternative approach: strengthening the foundations using cementation during horizontally oriented excavation. The essence of the technology lies in the installation (using technologies that allow for trenchless horizontal drilling) of horizontal polyethylene (coiled tubing) pipes under or along the building foundation. Through these pipes, using sleeve grouting technology, a hardening solution will be injected into the soil under pressure equal to the soil fracturing pressure. This will create hydraulic fractures in the soil, thereby increasing its mechanical characteristics.

Keywords: horizontally oriented grouting, high-pressure injection, soil foundation reinforcement, hydraulic fracturing, sleeve grouting technology, review

For citation: Pronozin Y. A., Sugonyaev I. V., Bragar E. P., Kaigorodov M. D. Hydraulic fracturing method for strengthening soil foundations under building foundations during horizontal drilling. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):21–38. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-21-38>



1. Введение / Introduction

Обеспечение устойчивости зданий и сооружений является важной инженерной задачей. Необходимость усиления грунтовых оснований возникает как при строительстве новых объектов, так и при реконструкции уже существующих. Известен достаточно широкий спектр технологий укрепления слабых грунтов. В частности, хорошо себя зарекомендовал метод усиления через направленные гидроразрывы.

Целью настоящего исследования был анализ методов гидравлического разрыва пласта (ГРП) при горизонтально ориентированных скважинах, а также способов усиления грунтовых оснований под фундаментами существующих зданий с применением высоконапорной инъекции, в том числе выполненных по манжетной технологии. Было рассмотрено поведение гидроразрыва в массиве грунта, которое зависит от давления гидроразрыва и напряженно-деформированного состояния грунта.

Анализ литературных источников позволил выявить ряд ключевых особенностей существующих методов, их преимущества и недостатки. В частности, был сделан вывод, что усиление гидроразрывами производят зачастую с помощью вертикальных либо наклонных инъекторов, что требует остановки производственных процессов либо выселения жильцов, если усиление производится изнутри здания. На основании этого был предложен альтернативный метод – усиление грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке, – который позволяет укреплять грунтовое основание, не затрагивая внутреннее пространство здания.

2. Методы поиска литературы / Literature search methods

При выполнении литературного обзора основной акцент был сделан на применении гидравлических разрывов в различных областях промышленности, в том числе строительной отрасли, где гидроразрыв пласта применяется для усиления грунтовых оснований. В выборку были включены отечественные и зарубежные научные публикации, диссертационные исследования, патенты, монографии последних 10 лет.

Поиск литературы осуществлялся по ключевым словам: усиление грунтовых оснований, технология применения гидроразрывов в нефтедобывающей и строительной отрасли, технология горизонтально направленного бурения в нефтедобывающей и строительной отраслях, горизонтальные инъекторы, вертикальные и наклонные инъекторы, манжетная технология, цементация, высоконапорная инъекция, закрепление грунтов, изменение НДС грунта при гидроразрывах.

3. Обзор литературы / Literature review

Применение гидроразрывов в нефтедобывающей промышленности

Гидравлический разрыв пласта уже более 50 лет используется в нефтяной промышленности [1] для получения доступа к различным углеводородным коллекторам путем создания высокопроводящих каналов в пластах с плотными породами, также он применяется в геотехнике и в горной промышленности. В последнее время данная технология обрела большую популярность в связи с разработкой месторождений сланцевого газа и реализацией геотермальных проектов.

На рис. 1 представлено схематическое изображение нескольких гидравлических разрывов, созданных при многоступенчатой обработке пласта горизонтального ствола скважины. В настоящее время это достаточно популярный способ заканчивания скважин для плотных пород-коллекторов [2, 3].

Использование ГРП в открытых скважинах сопряжено со множеством проблем, например, когда ствол скважины, ориентированный вдоль минимального напряжения дальнего поля, способствует поперечной ориентации гидравлических трещин относительно ствола скважины, что увеличивает площадь контакта трещины с пластом. Однако это не означает, что гидравлические разломы зарождаются в поперечном направлении от ствола скважины, особенно в случае открытого ствола, из-за растягивающих обрушивающих напряжений, развивающихся вблизи ствола скважины [4, 5]. Трещина, начавшаяся в продольном направлении, при переориентации в предпочтительное поперечное направление, создает нежелательную извилистость вблизи ствола скважины.

Считается, что при выполнении гидравлического разрыва пласта вдоль ствола скважины образуются две плоскости трещин. Направление и ориентация этих плоскостей зависят от напряженно-деформированного состояния пласта (рис. 2). Зачастую эти плоскости трещин распространяются ортогонально наименьшему главному напряжению σ_h [6].

Таким образом, значительный интерес вызывают два вида трещин в стволе скважины [7]:

- продольные, которые распространяются в плоскостях, параллельных осям ствола скважины, они образуются там, где горизонтальные скважины бурятся параллельно большему из горизонтальных напряжений или параллельно предпочтительной плоскости разрыва (рис. 3а);
- поперечные, которые распространяются в плоскостях, перпендикулярных осям ствола скважины, они образуются там, где го-

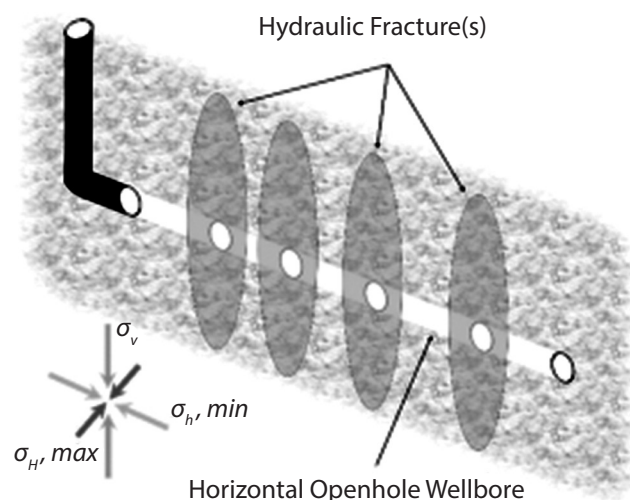


Рис. 1. Схема распространения гидроразрывов [1]
Fig. 1. Hydraulic fracture propagation pattern [1]

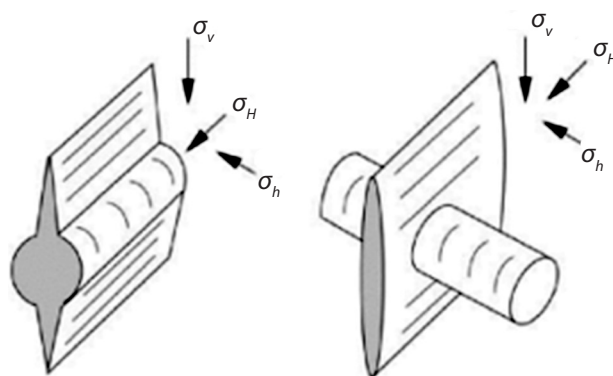


Рис. 2. Различные ориентации плоскости разрушения в зависимости от направлений главных напряжений [9]
Fig. 2. Varied orientations of the failure plane based on principal stress directions [9]

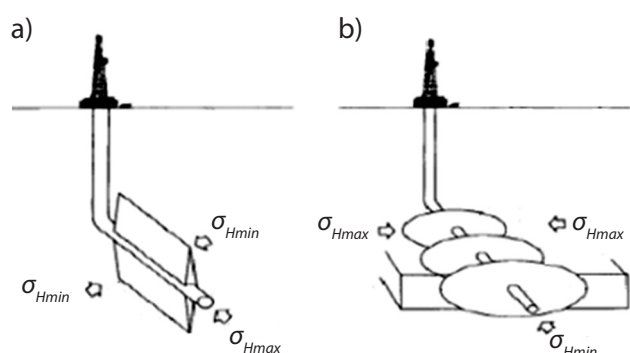


Рис. 3. Гидравлические разрывы в горизонтальных скважинах: а) продольные; б) поперечные¹
Fig. 3. Hydraulic fractures in horizontal wells: а) longitudinal; б) transverse¹

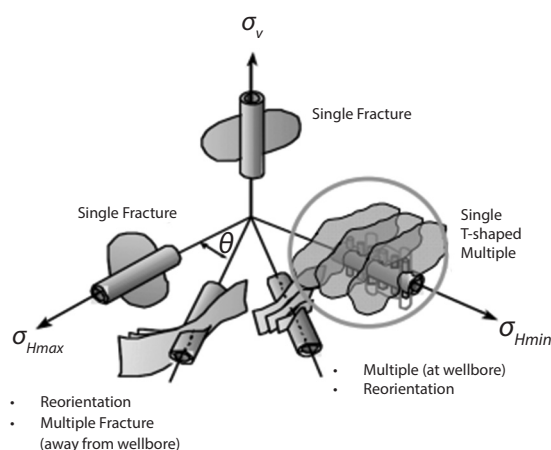


Рис. 4. Геометрия гидроразрыва, основанная на положении ствола скважины относительно главных напряжений²
Fig. 4. Hydraulic fracture geometry based on wellbore orientation relative to principal stresses²

ризонгальные скважины бурятся перпендикулярно большему из горизонтальных напряжений или перпендикулярно предпочтительной плоскости разрыва (рис. 3б).

Анализируя [8], можно прийти к выводу, что горизонтальный ствол скважины, расположенный нормально к максимальному напряжению в пласте, создает наиболее сложную сеть гидравлических разрывов (рис. 4), поскольку способствует образованию серии поперечных трещин вдоль горизонтального ствола. Сложная сеть трещин увеличивает эффективную проницаемость пласта, тем самым повышая добычу.

При этом важным для выполнения исследований ГРП является разрушение при растяжении, из-за того что хрупкие породы зачастую разрушаются под действием напряжений σ , которые превышают предел прочности σ_T материала [9]. Если предположить, что сжимающие напряжения имеют положительный знак, то критерий разрушения удовлетворяет условию:

$$\sigma < -\sigma_T. \quad (1)$$

Однако гидроразрыв пласта проводится и в пористых средах с поровым давлением P_p , поэтому полное напряжение заменяется эффективным напряжением [9]. Тогда уравнение будет иметь следующий вид:

$$\sigma - P_p < \sigma_T. \quad (2)$$

Выражение (2) означает, что как только эффективное напряжение достигает предела прочности при растяжении, начинается разрушение породы.

Уравнения для определения давления пробоя в горизонтальной скважине для различных режимов напряжений отражены в работе [10], в настоящей работе они не будут приведены. Уравнение (3) основано на предположении, что проникновение жидкости в пласт отсутствует. Очевидно, что изменение порового давления будет влиять на давление пробоя. Если поровое давление начнет увеличиваться, то давление пробоя станет уменьшаться.

¹ Иллюстрация из: Salamanca M. S. *Modeling of fractured producer and injection in low permeability reservoir*. Master's thesis. Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Engineering and Applied Geophysics. 2013.

² Иллюстрация из: Lewis G. Improving the effectiveness and managing the impact of hydraulic fracturing. *International Gas Union Research Conference*. 2011;1–9.

$$p_{wf} = 3\sigma_h - \sigma_h - p_f. \quad (3)$$

Уравнение (3) характеризует верхнюю границу для оценки давления инициирования. Нижняя граница выражается моделью Хаимсона [10, 11]:

$$p_{wf} = \frac{3\sigma_h - \sigma_h + \sigma_t - a \frac{1-2\nu}{1-\nu} p_f}{2 - a \frac{1-2\nu}{1-\nu}}. \quad (4)$$

Технические инструменты и материалы для проведения инъекций

Основными техническими инструментами, используемыми в процессе воздействия и после него на породу, являются: кольцевые изоляторы (например, стрэддл-пакеры), механические изоляторы (например, сдвиговые или раздвижные муфты, шаровые герметизаторы и системы шаровых седел), заглушки, трубы, колтюбинги и перфорационные инструменты [9]. Следует отметить, что применение ГРП с использованием колтюбинга является наиболее предпочтительным. Гибкие насосно-компрессорные трубы – это трубы (или каналы) из ковкой стали небольшого диаметра (обычно от 25 до 50 мм), которые наматываются на катушку и могут использоваться для закачки жидкости (либо цемента) в ствол скважины. В [11] перфорация определена как процесс создания туннелей через цементированную стальную обсадную колонну и горную породу, чтобы пластовая жидкость имела возможность течь в скважину. Это определение справедливо для применения в нефтяной промышленности. Перфорация также может быть проведена вдоль незацементированных частей ствола скважины.

В рамках работ по проведению гидроразрыва пласта наиболее эффективными на североамериканских сланцевых месторождениях оказались три типа завершающих работ (таблица 1). Это системы Plug-and-Perf (подключи и работай), Ball-Activated (системы с шариковым приводом), Coiled Tubing-Activated (системы с колтюбинговым приводом) [12].

Таблица 1. Типы завершения работ
Table 1. Types of completion

Тип завершения	Отвод жидкости	Изоляция сквозных труб	Скважинная изоляция
Plug-and-Perf	Перфорация	Композитные мостовидные заглушки	Цемент
Ball-Activated	Рукава для ГРП	Шар для гидроразрывов и шаровое седло	Пакеры для открытых скважин
Coiled Tubing-Activated	Рукава для ГРП	Пакер для колтюбинга	Цемент

Согласно технологии Plug-and-Perf, перфорация используется для отвода жидкости при гидроразрыве, композитные мостовидные заглушки для изоляции отверстий, насосно-компрессионная труба и цемент для изоляции затрубного пространства открытой скважины и обсадной колонны (рис. 5a). В системах, которые активируются шариками для гидроразрыва, используются втулки, поддерживающие посадочные места для шариков разного размера (рис. 5b). Когда эти шарики попадают в посадочные места, давление открывает муфту для выполнения гидроразрыва, шарик, в свою очередь, обеспечивает изоляцию трубопровода от ранее разрушенной ступени. Кольцевая изоляция выполняется с помощью пакеров для открытых скважин. В системах Coiled Tubing-Activated (рис. 5c) используются манжеты, которые открываются с помощью колтюбинга. Изоляция сквозных труб выполняется с помощью пакера для колтюбинга, кольцевая изоляция осуществляется с помощью цемента. Последние технологические достижения для этих типов заканчиваний привели к появлению множества гибридных систем. При этих гибридных заканчиваниях для изоляции кольцевого про-

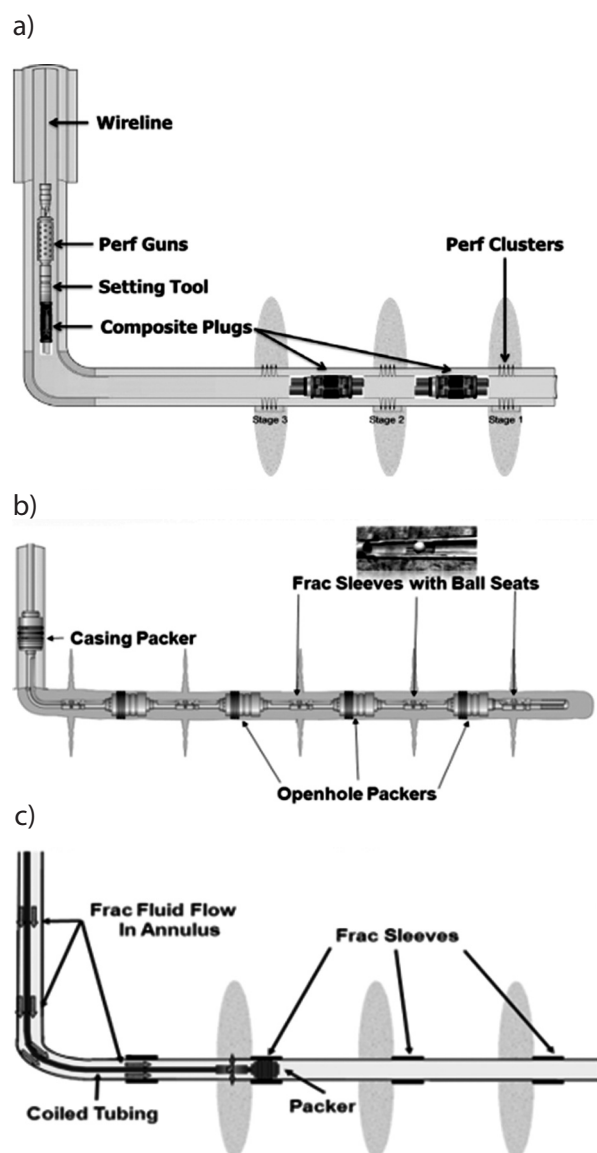


Рис. 5. Системы завершения работ:
a) Plug-and-Perf – обсадная скважина; b) Ball-Activated – открытая скважина; c) Coiled Tubing-Activated – обсадная или открытая скважина [12]
Fig. 5. Completion systems: a) Plug-and-Perf – cased hole; b) Ball-Activated – open hole; c) Coiled Tubing-Activated – cased or open hole [12]

будут затвердевать в грунте, изменяя его механические характеристики и создавая избыточное напряженное состояние. Для усиления оснований требуется оборудование гораздо меньшей мощности, так как работа проводится в поверхностных рыхлых слоях.

Метод высоконапорного инъецирования твердеющего раствора успешно реализуется для решения многих геотехнических задач:

- усиления оснований грунтового массива и фундаментов реконструируемых и аварийных зданий и сооружений [14, 15];
- усиления свайных фундаментов [16];

странства могут использоваться либо цемент, либо пакеры с открытым отверстием.

На основании вышеизложенной информации можно отметить, что процесс инициирования очень сложен и зависит от:

- жидкости для разрыва, давления жидкости и скорости закачки,
- размера и ориентации ствола скважины,
- напряженно-деформированного состояния породы,
- свойства породы,
- применяемого оборудования.

Развитие технологий бокового и горизонтального бурения дает возможность разрабатывать нетрадиционные ресурсы путем размещения небольших скважин в оптимальных для добычи местах. Гидравлический разрыв пласта остается важной и необходимой процедурой интенсификации добычи, которая проводится с высокой степенью оптимизации и в сочетании с уникальными процедурами заканчивания скважин.

Применение гидроразрывов в геотехническом строительстве

Несмотря на то, что наиболее мощное развитие метод гидроразрыва получил в нефтедобывающей промышленности, в геотехническом строительстве его начали применять раньше. Основываясь на современном опыте использования гидравлического разрыва пласта, технологии нефтяной промышленности, позволяющие бурить горизонтальные и наклонные скважины, можно адаптировать для сферы промышленного гражданского строительства для закрепления и усиления грунтовых оснований под существующими фундаментами зданий и сооружений [13]. Разница в том, что вместо жидкости для разрыва пласта будут использовать различные растворы для усиления оснований, которые со временем

- выравнивания кренов зданий и сооружений из-за неравномерных осадок [17];
- изменения НДС в грунтовом массиве зданий в процессе реконструкции и строительства [18];
- компенсационного нагнетания в условиях стесненной застройки [19];
- создания инъекционных, буроинъекционных и напорнонабивных свай [20, 21];
- стабилизации просадочных лессовых грунтов [22];
- уплотнения насыпных грунтов, а также грунтов, которые содержат органические включения [23];
- закрепления грунтового основания с целью повышения устойчивости откосов и склонов [24];
- усиления многолетнемерзлых и искусственно замороженных грунтов [25];
- выполнения мероприятий по защите существующих зданий и сооружений при разработке котлованов [26];
- усиления и лечения земляного полотна автомобильных и железных дорог [27, 28];
- выполнения геотехнических барьеров, противофильтрационных завес [29] и регулирования НДС грунтового массива [26];
- преднапряжения грунтового массива фундаментных оболочек и плитных фундаментов [30, 31];
- повышения несущей способности буронабивных свай по нижнему концу и боковой поверхности [32].

К достоинствам высоконапорной инъекции можно отнести:

- возможность проведения работ в широком диапазоне грунтовых условий;
- высокую эффективность;
- возможность применения малогабаритного оборудования и производства работ в стесненных условиях;
- возможность выполнения работ без остановки производства, выселения жильцов или ограничения движения транспорта;
- отсутствие динамических воздействий на существующую застройку при проведении работ;
- возможность оперативного изменения технического решения и параметров производства работ;
- экологичность метода;
- надежность;
- управление процессом изменения НДС с возможностью проведения геотехнического мониторинга.

Основным недостатком метода высоконапорной инъекции является невозможность определения путей распространения твердеющего раствора в грунтовом основании вокруг одиночного инъектора. Следовательно, размеры и форма создаваемых инъекционных тел не поддаются точному прогнозированию (рис. 8) [33]. Существует ряд конструкций инъекторов, а также технологических схем нагнетания, которые позволяют в той или иной степени влиять на результат инъекционных работ. Но их использование является довольно трудоемким и/или материалозатратным, при этом некоторые из них имеют недостаточную надежность.

Исследованиями в области усиления грунтов высоконапорной инъекцией в режиме гидроразрыва с применением вертикальных и наклонно-направленных скважин занимались такие ученые, как Мухаммед Аббуд, В. А. Богомолов, Л. А. Бартоломей, О. В. Герасимов, В. А. Ермолаев, М. Н. Ибрагимов, А. Камбефор, А. Л. Ланис, Р. А. Мангушев, О. А. Мозгачева, М. Л. Нуждин, Я. А. Пронозин, М. А. Самохвалов, И. И. Сахаров, О. А. Шулятьев [34–50]. Результаты этих многочисленных исследований подтвердили, что разрывы грунта, как и гидравлические разрывы пласта, возникают, в первую очередь, ортогонально наименьшему главному напряжению [45], как показано на рис. 9.

Опыты по определению эффективности циклического и одиночного нагнетания проведены М. А. Самохваловым [34]. Результаты исследований показали, что по сравнению с одиночным нагне-

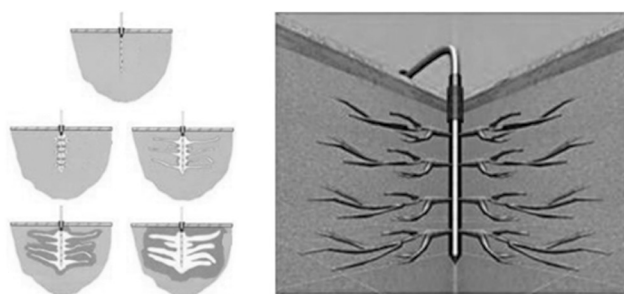
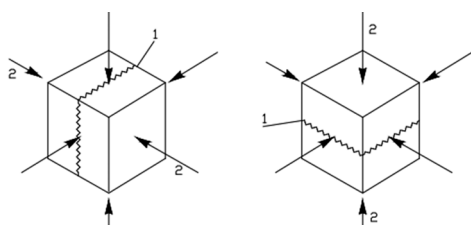


Рис. 8. Схематическое распространение твердеющего раствора в грунтовом основании при нагнетании через одиночный инъектор [33]
Fig. 8. Schematic of hardening solution propagation in soil foundation during injection through a single injector [33]



1 – плоскость разрыва / fracture plane
2 – наименьшее главное напряжение / minimum principal stress

Рис. 9. Направление гидравлического разрыва в грунте [38]
Fig. 9. Hydraulic fracture direction in soil [38]

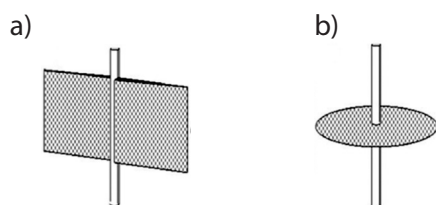


Рис. 10. Схемы формирования гидравлических разрывов в грунтовом массиве: а) в вертикальной плоскости; б) в горизонтальной плоскости [35]
Fig. 10. Hydraulic fracture formation patterns in soil mass: a) vertical plane; b) horizontal plane [35]

тельстве³. На схеме закрепления грунтов под зданием с размерами в плане 17.0 × 16.0 м видно, что из предварительно разработанных технологических колодцев пробуривается определенное количество горизонтальных скважин, через которые проходят инъекторные перфорированные трубы 5 с последующим закреплением грунтов через перфорированные отверстия, имеющие резиновую обойму (манжету) 7 (рис. 12).

танием раствора циклическое является более эффективным, так как происходит увеличение количества сформированных гидравлических разрывов на каждом горизонте инъекции. Также при увеличении повторов инъектирования наблюдается формирование гидравлических разрывов как в вертикальной плоскости (рис. 10а), так и в плоскости горизонта инъекции (рис. 10б). Из-за переуплотнения грунтового основания ранее сформированными гидравлическими разрывами в вертикальной плоскости и перераспределения напряжений наблюдается постепенное увеличение вертикальных напряжений и уменьшение радиальных.

Согласно исследованиям М. Л. Нуждина [53], размерами и формой полученных гидроразрывов можно управлять с помощью расположения инъекторов в пространстве. Они могут располагаться по прямой линии либо по вершинам равностороннего треугольника, тем самым образуя вертикальные (рис. 10а) или горизонтальные разрывы в виде диска (рис. 10б).

Изменение площади профилей гидравлических разрывов в грунтовом массиве при инъекции твердеющего раствора зависит также от давления (рис. 11) [38].

Согласно данным [39, 40, 46, 47, 51], давление разрыва можно найти по эмпирическим формулам, которые представлены в таблице 2.

Пример горизонтального закрепления грунтовых оснований под фундаментом существующего здания (церкви Ризоположения в Московском Кремле) методом смолизации рассмотрен в Пособии по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строи-

³ Пособие по химическому закреплению грунтов инъекцией в промышленном и гражданском строительстве (к СНиП 3.02.01-83). Москва: Стройиздат, 1986. URL: <https://internet-law.ru/stroyka/text/11295/>.

Таблица 2. Определение давления гидроразрыва грунта
Table 2. Determining soil hydraulic fracturing pressure

Автор	Формула	Условные обозначения
М. Н. Ибрагимов	$P_{кр} = \gamma h \xi + C$	γ – средневзвешенная плотность толщи грунтов, т/м ³ ; ξ – коэффициент бокового давления; C – удельное сцепление грунта, кПа; h – глубина инъекции от дневной поверхности, м
А. Камбефор	$P_0 = \frac{\gamma_{zp} h}{\nu - 1} + C$	γ_{zp} – удельный вес грунта, т/м ³ ; h – глубина, м; ν – коэффициент Пуассона; C – сцепление грунта, кПа
G. W. Jaworski	$P_f = m \sigma_h + \sigma_{ta}$	m – наклон линейной функции давления разрыва пласта при горизонтальном напряжении; σ_h – давление разрыва пласта, кПа; σ_{ta} – предел прочности при растяжении, кПа
О. А. Шулятьев	$P_f = f(S_m, S_{ta})$	S_m – напряжение в массиве грунта, кПа; S_{ta} – сопротивление растяжению, кПа
М. Аббуд	$P_0 = \frac{\gamma h \nu}{1 - \nu} + C$	γ – удельный вес грунта; h – глубина, м; ν – коэффициент Пуассона; C – сцепление грунта, кПа; φ – угол внутреннего трения, кПа
	$P_0 = \frac{\gamma h \nu}{1 + \sin \varphi}$	

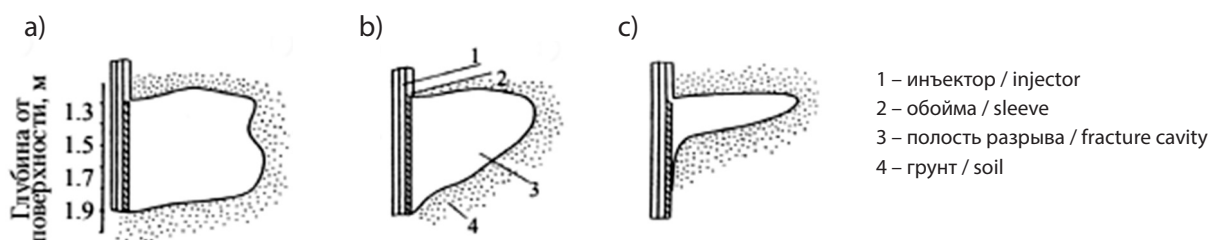


Рис. 11. Изменение площади гидравлических разрывов в грунте при инъекции твердеющего раствора в зависимости от давления: а) 1.25 МПа; б) 0.75 МПа; в) 0.5 МПа [38]

Fig. 11. Change in hydraulic fracture area in soil during hardening solution injection as a function of pressure: a) 1.25 MPa; b) 0.75 MPa; c) 0.5 MPa [38]

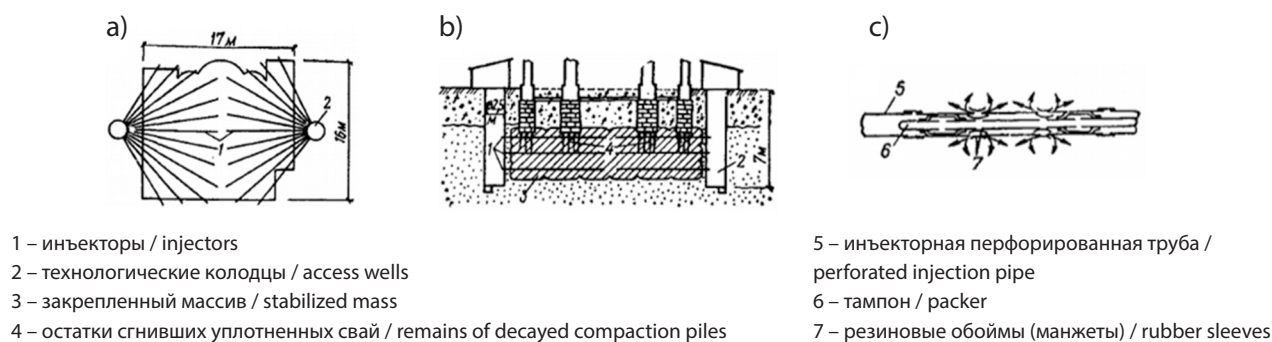


Рис. 12. Схема инъекционного химического закрепления грунтов⁴:

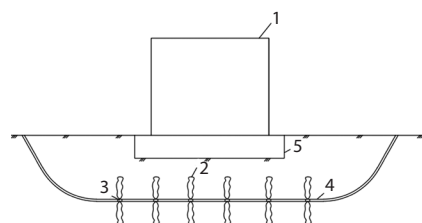
а) план; б) разрез; в) схема манжетно-тампонного иньектора

Fig. 12. Schematic of chemical grouting for soil stabilization⁴:
а) plan; б) section; в) schematic of sleeve-and-packer injector

⁴ Там же.

Усиление оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке

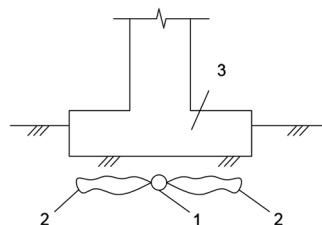
Анализ особенностей методов гидравлического разрыва и способов усиления грунтовых оснований с применением высоконапорной инъекции позволил предложить альтернативный способ усиления оснований фундаментов существующих зданий методом цементации при горизонтально ориентированной проходке (рис. 13).



- 1 – существующее здание / existing building
- 2 – гидроразрыв / hydraulic fracture
- 3 – резиновая манжета / rubber sleeve
- 4 – горизонтально ориентированная скважина / horizontally oriented borehole
- 5 – существующий фундамент / existing foundation

Рис. 13. Принципиальная схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке (рисунок авторов)

Fig. 13. Schematic diagram of soil foundation strengthening using cementation with horizontally oriented drilling (authors' illustration)



- 1 – горизонтально ориентированная скважина / horizontally oriented borehole
- 2 – гидроразрыв / hydraulic fracture
- 3 – фундамент мелкого заложения (ленточный) / shallow foundation (strip footing)

Рис. 14. Схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке ленточных фундаментов (рисунок авторов)

Fig. 14. Schematic of soil foundation strengthening using cementation with horizontally oriented drilling for strip footings (authors' illustration)

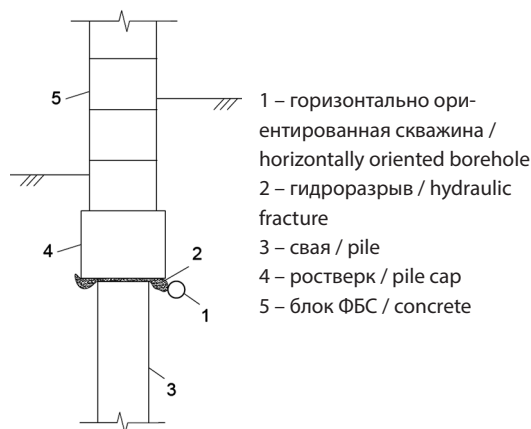


Рис. 15. Схема усиления контактной зоны основание – фундамент методом цементации при горизонтально ориентированной проходке вдоль свайных фундаментов (рисунок авторов)

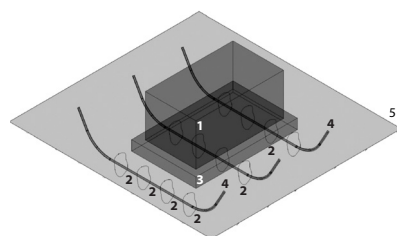
Fig. 15. Schematic of strengthening the contact zone between soil and foundation using cementation with horizontally oriented drilling along pile foundations (authors' illustration)

Схема усиления грунтовых оснований данным методом при горизонтально ориентированной проходке ленточных фундаментов большой протяженности представлена на рис. 14.

На рис. 15 показана схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке свайных фундаментов в случае, когда во время эксплуатации здания из-за некачественно выполненного сопряжения свай с ростверком появились зазоры между ростверком и сваями. Предложенный способ позволит заполнить это пространство твердеющим раствором.

Ортогональный вид усиления грунтовых оснований данным методом изображен на рис. 16.

Отличительной особенностью данного метода является то, что основная скважина, через которую будет поступать твердеющий раствор в грунт, имеет горизонтальную ориентацию, а не вертикальную или наклонную, как рассматривалось выше.



- 1 – существующее здание / existing building
- 2 – гидроразрыв / hydraulic fracture
- 3 – существующий фундамент / existing foundation
- 4 – труба для подачи раствора / grout injection pipe
- 5 – уровень земли / ground level

Рис. 16. Аксонометрическая схема усиления грунтовых оснований методом цементации при горизонтально ориентированной проходке (рисунок авторов)

Fig. 16. Axonometric schematic of soil foundation strengthening using cementation with horizontally oriented drilling (authors' illustration)

Сущность данного метода заключается в том, что с помощью установок горизонтального направленного бурения под зданием с поверхности пробуривается горизонтальная скважина [13, 52], после чего в эту скважину пропускается перфорированная труба ПВХ с резиновыми манжетами. В данную трубу помещается гидравлический пакер [47] для нагнетания твердеющего раствора по манжетной технологии, начинается подача раствора под давлением, превышающим критическое, с целью разрыва грунта. Для усиления каждой зоны цементация производится в челночном режиме требуемое количество раз.

Данный метод усиления грунтовых оснований позволит проводить работы снаружи здания (габариты здания в плане не имеют значения). Благодаря этому не нужно будет останавливать другие производственные процессы, выселять жильцов или ограничивать движение транспорта по прилегающей территории. По сравнению с методом химического закрепления (рис. 12) данный способ является экологически чистым.

Результаты сравнительного анализа методов горизонтально и вертикально направленного бурения, а также метода открытой траншеи сведены в таблицу 3.

Как видно из таблицы, метод горизонтально направленного бурения имеет ряд преимуществ.

Таблица 3. Сравнение методов горизонтально и вертикально направленного бурения и метода открытой траншеи
Table 3. Comparison of horizontal and vertical directional drilling methods and open trench method

Метод горизонтально направленного бурения	Метод открытой траншеи	Метод вертикально направленного бурения
Быстрое развертывание: - простая установка и минимум техники; - открытая траншея только на старте и на финише	Медленное развертывание: - привлечение большого количества техники для выемки и перемещения рунтов; - открытая выемка грунта на всем пути	Быстрое развертывание: простая установка и минимум техники
Гибкая установка: - бурение с поверхности; - возможность повторного выравнивания; - вертикально/горизонтально, чтобы избежать коммуникаций/препятствий	Жесткая установка: - открытый котлован на всем пути; - сложно изменить направление при встрече с коммуникациями и препятствиями; - сложно изменить направление траншеи	Жесткая установка: - бурение с поверхности; - невозможно изменить направление бурения; - ограниченная глубина бурения
Экологически чистый процесс: - минимальное количество работ по откопке траншеи; - меньше шума, пыли, мусора и отходов; - бентонит химически не вреден и может быть переработан	Экологически чистый процесс: - открытая выемка грунта; - большой отвал вынутых материалов; - перемещение грунта на месте, высокий уровень шума, много пыли; - огромное количество отходов, необходимость в тяжелой технике для перемещения грунта	Экологически чистый процесс: меньше мусора и отходов
Работы на автомобильных дорогах: - не требуется перекрытие дорог; - малое количество строительной техники	Работы на автомобильных дорогах: - ограничение движения транспорта; - большое количество строительной техники	Работы на автомобильных дорогах: - отсутствие перекрытия дорог; - малое количество строительной техники

4. Заключение / Conclusions

Изучение существующих методов гидравлических разрывов в нефтедобывающей отрасли (Plug-and-Perf, Ball-Activated, Coiled Tubing-Activated), а также в строительстве (метод гидроразрыва с применением вертикальных инжекторов и метод химического закрепления с применением горизонтальных инжекторов) позволило сделать ряд выводов:

1. Напряженно-деформированное состояние грунта влияет на распространение гидравлических разрывов, которые будут происходить в зонах наименьших напряжений, что дает возможность контролировать разрыв. Размерами и формой полученных гидроразрывов можно управлять с помощью расположения инжекторов в пространстве.
2. Существенным недостатком известных методов гидроразрыва, используемых в строительстве, является необходимость приостанавливать производственные процессы, переселять жильцов из зданий, подлежащих реконструкции, менять движение транспортных маршрутов.

На основании анализа особенностей, преимуществ и недостатков рассмотренных методов был предложен альтернативный способ усиления суглинистых и песчаных грунтовых оснований под плитными, свайными и ленточными фундаментами зданий и сооружений с помощью цементации при горизонтальной проходке. Так как основным плюсом данного метода является возможность выполнения работ без остановки производственных процессов и переселения жильцов, его применение могло бы оптимизировать процесс усиления фундамента. Тем не менее, предлагаемый метод требует дополнительного изучения и внедрения в геотехническую практику. К задачам дальнейших исследований можно отнести:

1. Обоснование рациональных параметров бурения и инъецирования грунтового основания по манжетной технологии для уплотнения грунтов основания, улучшения их механических характеристик и создания предварительного напряженного состояния в грунтовом массиве.
2. Выявление на основе экспериментальных, аналитических и численных исследований закономерностей изменения напряженно-деформированного состояния основания при различных схемах усиления грунтовых оснований твердеющими инъекционными составами.



Вклад авторов. Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.

Author contributions. All authors made an equal contribution to the preparation of the publication.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список литературы

1. Edelman E., Aidagulov G., Brady D. Acoustic analysis as means for detecting early-stage hydraulic fracture initiation in open and notched wellbores. In: *GEO-2016, 12th Middle East Geosciences Conference & Exhibition*. 2016;AAPG:90254. URL: https://www.researchgate.net/publication/309293165_Acoustic_Analysis_as_Means_for_Detecting_Early-Stage_Hydraulic_Fracture_Initiation_in_Open_and_Notched_Wellbores.
2. Al-Naimi K. M., Lee B. O., Bartko K. M., Kelkar S. K., Shaheen M., Al-Jalal Z., Johnston B. Application of a novel open hole horizontal well completion in Saudi Arabia. In: *SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Mumbai, India, 4–6 March*. 2008;SPE-113553-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/113553-MS>
3. Rahim Z., Al-Kanaan A., Johnston B., Wilson S., Al-Anazi H., Kalinin D. Success criteria for multistage fracturing of tight gas in Saudi Arabia. In: *SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 15–18 May*. 2011;SPE-149064-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/149064-MS>
4. Daneshy A. Horizontal-Well Fracturing: Why Is it So Different? *Journal of Petroleum Technology*. 2009;61(9):SPE-0909-0028-JPT. <http://dx.doi.org/10.2118/0909-0028-JPT>
5. Lecampion B., Abbas S., Prioul R. Competition between transverse and axial hydraulic fractures in a horizontal wells. In: *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4–6 February, Woodlands, TX, USA*. 2013;SPE-163848-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/163848-MS>

6. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., Risnes R. (eds.) *Petroleum related rock mechanics*. 2nd edition. Netherland: Elsevier; 2008. URL: <https://litbit.ru/edition/e-fjaer-rm-holt-p-horsrud-am-raaen-and-r-risnes-eds/petroleum-related-rock-mechanics-2nd-edition>.
7. Valko P., Economides M. J. *Hydraulic Fracture Mechanics*. Chichester: John Wiley & Sons; 1995. URL: <https://golnk.ru/qJagz>.
8. Aidagulov G., Alekseenko O., Chang F. F., Bartko K., Cherny S., Esipov D., Kuranakov D., Lapin V. Model of hydraulic fracture initiation from the notched open hole. In: *SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 21-23 April*. 2015;SPE-178027-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/178027-MS>
9. Yildizdag K., Weber F., Konietzky H. *Hydraulic fracturing*. Freiberg: TU Berg-akademie Freiberg, Geotechnical Institute; 2022. URL: https://tu-freiberg.de/sites/default/files/2023-11/15_Hydraulic_fracturing_3.pdf.
10. Hossain M. M., Rahman M. K., Rahman S. S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2000;27(3–4):129–149. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(00\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(00)00056-5)
11. Keshavarzi R. Laser perforation for hydraulic fracturing in oil and gas wells. In: *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. San Francisco, USA: American Rock Mechanics Association; 2011. URL: <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA11/ARMA11/ARMA-11-115/119550?redirectedFrom=PDF>.
12. Kennedy R. L., Gupta R., Kotov S. V., Burton W. A., Knecht W. N., Ahmed U. Optimized shale resource development: proper placement of wells and hydraulic fracture stages. In: *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 11 November*. 2012;SPE-162534-MS. <https://doi.org/10.2118/162534-MS>
13. Воробей Д. А., Майснер А. А., Семкин Д. С. Обзор установок горизонтально-направленного бурения и анализ эффективности способов управления траекторией бурения. *Техника и технологии строительства*. 2023;(2):26–33. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54092743>.
14. Ермолаев В. А., Мангушев Р. А. Научно-практическое обоснование применения метода высоконапорной инъекции (манжетной технологии) на объектах Санкт-Петербурга. В сб.: *Современные геотехнологии в строительстве и их научно-техническое сопровождение*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2014. Ч. 2. С. 9–19. URL: <https://studfile.net/preview/2630314/>.
15. Исаев Б. Н., Бадеев С. Ю., Цапкова Н. Н., Лунев А. Г., Кузнецов М. В., Бадеев В. С., Логутин В. В. Способ создания в грунтовом массиве пространственных структур из твердеющего материала. *Геотехника*. 2012;(5):4–12. URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-geotekhnika-52012/.
16. Крицкий М. Я., Сухорукова А. Ф., Лубягин А. В. Пути решения проблемы усиления грунтовых оснований объектов с учетом инженерно-геологических условий города Новосибирска. В сб.: *Инженерно-геологические проблемы урбанизированных территорий*. Екатеринбург: Аква-Пресс; 2001. Т. 2. С. 727–731.
17. Пронозин Я. А., Кайгородов М. Д. Регулирование геометрического положения зданий, в условиях сильносжимаемых грунтовых оснований. В сб.: *Механика грунтов в геотехнике и фундаментостроении*. Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ); 2018. С. 462–466. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35602798>.
18. Нуждин М. Л. Предупреждение неравномерных осадок фундаментной плиты с помощью высоконапорного инъецирования. В сб.: *Опыт строительства и реконструкции зданий и сооружений на слабых грунтах*. Архангельск: АрхГТУ; 2003. С. 119–122.
19. Ермолаев В. А., Мацегора А. Г., Осокин А. И., Трифонова И. И., Шахтарина Т. Н. Усиление оснований и фундаментов зданий вблизи расположенной застройки при строительстве глубоких котлованов в условиях городской застройки. В сб.: *Проектирование и строительство подземной части нового здания (второй сцены) Государственного академического Мариинского театра*. Санкт-Петербург: СПбГАСУ; 2011. С. 146–157.
20. Полищук А. И., Петухов А. А., Назин Д. С. *Способ устройства инъекционной сваи*. Российская Федерация. Патент № 2637002 С. 2016 г. 9 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38273645>.
21. Полищук А. И., Ющубе С. В., Петухов А. А., Нуйкин С. С. Опыт усиления фундаментов здания с использованием напорнонабивных свай. В сб.: *Актуальные проблемы проектирования и строительства в условиях городской застройки*. Пермь: ПГТУ; 2005. Т. 1. С. 149–155.
22. Ясько С. И., Семенов И. В., Чухряев Н. П. *Способ улучшения массива лессового просадочного грунта в основании зданий и сооружений*. Российская Федерация. Патент № 2331736. 2006 г. URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2331736C1_20080820.
23. Абелев М. Ю., Аверин И. В., Кораблева У. А. Экспериментальные исследования эффективности метода цементации грунтов «геокомпозит» в основании зданий на насыпных песках. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015;(2):13–15. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23605455>.
24. Осипов В. И., Филимонов С. Д. Уплотнение и армирование слабых грунтов методом «Геокомпозит». *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2002;(5):15–21.
25. Сахаров И. И., Захаров А. Е. Опыт высоконапорной инъекции в пластично-мерзлые грунты. *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2004;(8):168–171. URL: <https://707.su/cilY>.

26. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А., Поспехов В. С. *Освоение подземного пространства городов*. Москва: АСВ, 2017. 510 с.
27. Ланис А. Л. *Использование метода напорной инъекции при усилении земляного полотна железных дорог: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Москва: Московский государственный университет путей сообщения (МИИТ); 2009. 24 с. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01004372604.pdf.
28. Крицкий М. Я., Пусков В. И., Скоркин В. Ф., Ланис А. Л. Лечение болезней земляного полотна с использованием современных технологий. В сб.: *Труды международной научно-практической конференции по проблемам механики грунтов, фундаментостроению и транспортному строительству*. Пермь: ПГТУ; 2004. Т. 2. С. 47–53.
29. Фатеев Н. Т., Сергеев С. В., Карякин В. Ф., Гапон С. В., Щетинин О. В. Технология направленного гидроразрыва для создания в массиве пород ограждающих конструкций. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2008;(1):260–264. URL: <https://elibrary.ru/jupvny>.
30. Степанов М. А. *Взаимодействие комбинированных ленточных свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Тюмень: Тюменская государственная архитектурно-строительная академия; 2015. 25 с. URL: <https://golnk.ru/eD2Xa>.
31. Наумкина Ю. В. *Усиление ленточных фундаментов с переустройством в сплошную плиту переменной жесткости с предварительным напряжением грунтового основания: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет; 2013. 25 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005058567?page=1&rotate=0&theme=white>.
32. Stoker M. F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles. In: *Proceedings 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Helsinki; 1983. P. 167–170. URL: <https://eurekamag.com/research/020/372/020372770.php>.
33. Нуждин М. Л. *Усиление грунтового основания зданий методом пакетного высоконапорного инъектирования: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет; 2021. 24 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010769542>.
34. Самохвалов М. А. Ашихмин О. В., Токарев А. Е., Паронко А. А. Результаты экспериментальных исследований формирования гидроразрывов в пылевато-глинистых грунтах. *Инновации и инвестиции*. 2020;(3):294–297. URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/f55/№3-2020.pdf>.
35. Самохвалов М. А., Матюков А. А., Гейдт А. В., Паронко А. А. Результаты экспериментальных исследований манжетной технологии закрепления грунтов. *Инновации и инвестиции*. 2018;(10):249–252. URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/95b/№10%202018%20new.pdf>.
36. Самохвалов М. А. Ашихмин О. В., Цернант А. А. Определение состава инъекционного раствора для повышения качества закрепления грунтов по манжетной технологии. *Современные наукоемкие технологии*. 2018;(5):139–144. URL: <https://top-technologies.ru/article/view?id=37005>.
37. Самохвалов М. А. *Взаимодействие буроналивных свай, имеющих контролируемое уширение, с пылевато-глинистым грунтовым основанием: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Тюмень: Тюменский государственный архитектурно-строительный университет; 2016. 28 с. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006646888?page=2&rotate=0&theme=white>.
38. Ибрагимов М. Н. Усиление слабых грунтов инъекцией растворов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2019;23(4):69–80. URL: <https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/download/51/51>.
39. Ибрагимов М. Н. Вопросы проектирования и производства уплотнения грунтов инъекцией растворов по гидроразрывной технологии. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015;(2):22–27. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23605458>.
40. Аббуд М. *Геотехническое обоснование стабилизации осадок фундаментов с помощью инъекционного закрепления грунтов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2000. 22 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003208547>.
41. Богомолов В. А. *Метод высоконапорной инъекции связных грунтов при устройстве и усилении оснований и фундаментов: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Пермь: Пермский государственный технический университет; 2002. 18 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003228006?ysclid=m704d17gf4667484184>.
42. Ермолаев В. А. *Закрепление оснований зданий и сооружений методом гидроразрыва при неоднократном инъектировании: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук*. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2013. 25 с. URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005543569?ysclid=m704eow4a560690510>.

43. Ломов П. О., Ланис А. Л., Гребенников И. О. Оценка деформационных характеристик грунтовых массивов, армированных вертикальными элементами. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023;(3):22–37. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37>
44. Кононенко Д. В., Личман А. Р., Нуждин М. Л. Лабораторные исследования формы инъекционных тел, полученных нагнетанием расширяющегося геополимера. В сб.: *Актуальные проблемы современного фундаментостроения с учетом энергосберегающих технологий: сборник материалов XV Всероссийской научно-практической конференции, Пенза, 21 мая 2024 года*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2024. С. 19–22.
45. Ибрагимов М. Н., Семкин В. В. *Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов*. Москва: АСВ; 2012.
46. Камбефор А. *Инъекция грунтов. Принципы и методы*. Москва: Энергия; 1971. 333 с.
47. Шулятьев О. А., Мозгачева О. А. Снижение осадки фундамента за счет изменения напряженнодеформированного состояния основания путем инъекции твердеющего раствора. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2020;(3):121–148. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\(26\)-121-148](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148)
48. Пронозин Я. А., Степанов М. А., Шуваев А. Н., Давлатов Д. Н. Взаимодействие системы усиления свайных фундаментов с предварительно опрессованным грунтовым основанием эксплуатируемого сооружения. *Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура*. 2018;9(3):42–52. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2018.3.05>
49. Мангушев Р. А., Гарнык Л. В., Трифонова И. И. Влияние защитных геотехнических мероприятий на стабилизацию осадок аварийного здания. *Вестник гражданских инженеров*. 2016;(4):85–93. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26673483>.
50. Сахаров И. И. К вопросу об адаптации манжетной технологии для целей укрепительной инъекции оснований зданий. *Реконструкция городов и геотехническое строительство*. 2000;(2). URL: <http://georeconstruction.net/journals/02/6/6.htm>.
51. Jaworski G. W., Seed H. B., Duncan J. M. Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981;107(6):713–732. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90537-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90537-4)
52. Mohd Norizam M. S., Nuzul Azam H., Helmi Zulhaidi S., Abdul Aziz A., Nadzrol Fadzil A. Literature review of the benefits and obstacle of horizontal directional drilling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;271:012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012094>
53. Нуждин М. Л., Нуждин Л. В. Экспериментальное подтверждение возможности создания в грунтовом массиве инъекционных тел установленной формы. *Известия вузов. Строительство*. 2019;(10):101–112. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41831500>.

References

1. Edelman E., Aidagulov G., Brady D. Acoustic analysis as means for detecting early-stage hydraulic fracture initiation in open and notched wellbores. In: *GEO-2016, 12th Middle East Geosciences Conference & Exhibition*. 2016;AAPG:90254. URL: https://www.researchgate.net/publication/309293165_Acoustic_Analysis_as_Means_for_Detecting_Early-Stage_Hydraulic_Fracture_Initiation_in_Open_and_Notched_Wellbores.
2. Al-Naimi K. M., Lee B. O., Bartko K. M., Kelkar S. K., Shaheen M., Al-Jalal Z., Johnston B. Application of a novel open hole horizontal well completion in Saudi Arabia. In: *SPE Indian Oil and Gas Technical Conference and Exhibition, Mumbai, India, 4–6 March*. 2008;SPE-113553-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/113553-MS>
3. Rahim Z., Al-Kanaan A., Johnston B., Wilson S., Al-Anazi H., Kalinin D. Success criteria for multistage fracturing of tight gas in Saudi Arabia. In: *SPE/DGS Saudi Arabia Section Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 15–18 May*. 2011;SPE-149064-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/149064-MS>
4. Daneshy A. Horizontal-Well Fracturing: Why Is it So Different? *Journal of Petroleum Technology*. 2009;61(9):SPE-0909-0028-JPT. <http://dx.doi.org/10.2118/0909-0028-JPT>
5. Lecampion B., Abbas S., Prioul R. Competition between transverse and axial hydraulic fractures in a horizontal wells. In: *SPE Hydraulic Fracturing Technology Conference, 4–6 February, Woodlands, TX, USA*. 2013;SPE-163848-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/163848-MS>
6. Fjaer E., Holt R. M., Horsrud P., Raaen A. M., Risnes R. (eds.) *Petroleum related rock mechanics*. 2nd edition. Netherland: Elsevier; 2008. URL: <https://litbit.ru/edition/e-fjaer-rm-holt-p-horsrud-am-raaen-and-r-risnes-eds/petroleum-related-rock-mechanics-2nd-edition>.
7. Valko P., Economides M. J. *Hydraulic Fracture Mechanics*. Chichester: John Wiley & Sons; 1995. URL: <https://golnk.ru/qJagz>.
8. Aidagulov G., Alekseenko O., Chang F. F., Bartko K., Cherny S., Esipov D., Kuranakov D., Lapin V. Model of hydraulic fracture initiation from the notched open hole. In: *SPE Saudi Arabia Section Annual Technical Symposium and Exhibition, Al-Khobar, Saudi Arabia, 21–23 April*. 2015;SPE-178027-MS. <http://dx.doi.org/10.2118/178027-MS>
9. Yildizdag K., Weber F., Konietzky H. *Hydraulic fracturing*. Freiberg: TU Berg-akademie Freiberg, Geotechnical Institute; 2022. URL: https://tu-freiberg.de/sites/default/files/2023-11/15_Hydraulic_fracturing_3.pdf.

10. Hossain M. M., Rahman M. K., Rahman S. S. Hydraulic fracture initiation and propagation: roles of wellbore trajectory, perforation and stress regimes. *Journal of Petroleum Science and Engineering*. 2000;27(3–4):129–149. [https://doi.org/10.1016/S0920-4105\(00\)00056-5](https://doi.org/10.1016/S0920-4105(00)00056-5)
11. Keshavarzi R. Laser perforation for hydraulic fracturing in oil and gas wells. In: *45th US Rock Mechanics / Geomechanics Symposium*. San Francisco, USA: American Rock Mechanics Association; 2011. URL: <https://onepetro.org/ARMAUSRMS/proceedings-abstract/ARMA11/ARMA11/ARMA-11-115/119550?redirectedFrom=PDF>.
12. Kennedy R. L., Gupta R., Kotov S. V., Burton W. A., Knecht W. N., Ahmed U. Optimized shale resource development: proper placement of wells and hydraulic fracture stages. In: *Abu Dhabi International Petroleum Conference and Exhibition, Abu Dhabi, UAE, 11 November*. 2012;SPE-162534-MS. <https://doi.org/10.2118/162534-MS>
13. Vorobei D. A., Meissner A. A., Semkin D. S. Review of horizontal directional drilling rigs and analysis of efficiency control methods for drilling trajectory. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva*. 2023;(2):26–33. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54092743>.
14. Ermolaev V. A., Mangushev R. A. Scientific and practical substantiation of application of the method of high-pressure injection (collar technology) on the objects of St. Petersburg. In: *Sovremennye geotekhnologii v stroitel'stve i ih nauchno-tekhnicheskoe soprovozhdenie*. Saint Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2014. Part. 2. P. 9–19. (In Russ.) URL: <https://studfile.net/preview/2630314/>.
15. Isayev B. N., Badeyev S. Yu., Tsapkova N. N., Lunev A. G., Kuznetsov M. V., Badeyev V. S., Logutin V. V. A way to create spatial structures of hardening material in a soil massif. *Geotechnics*. 2012;(5):4–12. (In Russ.) URL: https://www.geomark.ru/journals_list/zhurnal-geotekhnika-52012/.
16. Krickij M. Ya., Suhorukova A. F., Lubyagin A. V. Ways of solving the problem of reinforcing soil foundations of objects taking into account engineering-geological conditions of Novosibirsk city. In: *Inzhenerno-geologicheskie problemy urbanizirovannykh territorij*. Yekaterinburg: Akva-Press; 2001. Vol. 2. P. 727–731. (In Russ.)
17. Pronozin Ya. A., Kajgorodov M. D. Regulation of the geometric location of buildings, In terms of sales generic ground bases. In: *Mekhanika gruntov v geotekhnike i fundamentostroenii*. Novocherkassk: SURGPU (NPI); 2018. P. 462–466. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=35602798>.
18. Nuzhdin M. L. Prevention of uneven settlement of the foundation slab by means of high-pressure injection. In: *Opyt stroitel'stva i rekonstruktsii zdaniy i sooruzheniy na slabyykh gruntakh*. Arkhangelsk: ASTU; 2003. P. 119–122. (In Russ.)
19. Ermolaev V. A., Matsegora A. G., Osokin A. I., Trifonova I. I., Shakhhtarina T. N. Reinforcement of bases and foundations of buildings in the vicinity of the development during construction of deep excavations in urban areas. In: *Proektirovanie i stroitel'stvo podzemnoi chasti novogo zdaniya (vtoroi stseny) Gosudarstvennogo akademicheskogo Mariinskogo teatra*. St. Petersburg: SPSUACE; 2011. (In Russ.) P. 146–157.
20. Polishchuk A. I., Petukhov A. A., Nazin D. S. *Method of arranging injection pile*. Russian Federation. Patent No. 2637002 C. 2016. 9 p. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=38273645>.
21. Polishchuk A. I., Yushchube S. V., Petukhov A. A., Nuykin S. S. Experience in reinforcing building foundations with using pressure piles. In: *Aktual'nyye problemy proyektirovaniya i stroitel'stva v usloviyakh gorodskoy zastroyki*. Perm': PSTU; 2005. V. 1. P. 149–155.
22. Jas'ko S. I., Semenov I. V., Chukhrjaev N. P. *Method for improving massive of loessial collapsible soil in base of buildings and structures*. Russian Federation. Patent No. 2331736. 2006. (In Russ.) URL: https://yandex.ru/patents/doc/RU2331736C1_20080820.
23. Abelev M. Y., Averin I. V., Korableva U. A. Experimental investigations of the effectiveness of the "Geocomposite" method of soil grouting in the beds of buildings on backfill sands. *Soil mechanics and foundation engineering*. 2015;52:84–87. <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9310-3>
24. Osipov V. I., Filimonov S. D. Compaction and reinforcement of weak soils by "Geocomposite" method. *Soil mechanics and foundation engineering*. 2002;(5):15–21. (In Russ.)
25. Sakharov I. I., Zakharov A. Ye. Experience of high-pressure injection into plastic-frozen soils. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2004;(8):168–171. (In Russ.) URL: <https://707.su/cilY>.
26. Shulyat'yev O. A., Mozgacheva O. A., Pospekhov V. S. *Development of underground space of cities*. Moscow: ASV, 2017. (In Russ.)
27. Lanis A. L. *Use of the method of pressure injection at reinforcement of railroad subgrade: Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences*. Moscow: Moscow State University of Railway Transport (MIIT); 2009. (In Russ.) URL: https://new-dissert.ru/_avtoreferats/01004372604.pdf. (In Russ.)
28. Kritskiy M. Ya., Puskov V. I., Skorkin V. F., Lanis A. L. Treatment of earth bed diseases using modern technologies. In: *Trudy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii po problemam mekhaniki gruntov, fundamentostroyeniya i transportnomu stroitel'stvu*. Perm: PSTU; 2004. Vol. 2. P. 47–53. (In Russ.)
29. Fateyev N. T., Sergeyev S. V., Karyakin V. F., Gapon S. V., Shchetinin O. V. Technology of directional hydraulic fracturing for creation of enclosing structures in rock massifs. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2008;(1):260–264. (In Russ.) <https://elibrary.ru/jupvnnv>.

30. Stepanov M. *Interaction of combined strip pile foundations with pre-pressurized soil foundation soil foundation: thesis abstract for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Tyumen: Tyumen State Academy of Architecture and Civil Engineering; 2015. (In Russ.) URL: <https://golnk.ru/eD2Xa>.
31. Naumkina Yu. V. *Reinforcement of strip foundations with conversion into a continuous slab of variable stiffness with prestressing of the ground base: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Tyumen: Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; 2013. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01005058567?page=1&rotate=0&theme=white>.
32. Stoker M. F. The influence of post grouting on the load bearing capacity of bored piles. In: *Proceedings 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Helsinki; 1983. P. 167–170. URL: <https://eurekamag.com/research/020/372/020372770.php>.
33. Nuzhdin M. L. *Strengthening of the soil base of buildings by the method of packet high-pressure injection: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Perm: Perm National Research Polytechnic University; 2021. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01010769542>.
34. Samokhvalov M. A., Ashikhmin O. V., Tokarev A. E., Paronko A. A. Results of experimental investigations of the formation of hydraulic fractures in dust-clay soils. *Innovatsii i investitsii*. 2020;(3):294–297. (In Russ.) URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/f55/N3-2020.pdf>.
35. Samokhvalov M. A., Matykov A. A., Geydt A. V., Paronko A. A. The results of experimental researches of the lip technology of soil solidification. *Innovatsii i investitsii*. 2018;(10):249–252. (In Russ.) URL: <https://innovazia.ru/upload/iblock/95b/N10%202018%20new.pdf>.
36. Samokhvalov M. A., Ashikhmin O. V., Tsernant A. A. Determination of grout mix composition to increase the quality of ground improvement for tube-a-manchette grouting. *Modern High Technologies*. 2018;(5):139–144. (In Russ.) URL: <https://top-technologies.ru/article/view?id=37005>.
37. Samokhvalov M. A. *Interaction of drill-injection piles with controlled widening with dusty-clay soil base: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Tyumen: Tyumen State University of Architecture and Civil Engineering; 2016. URL: <https://viewer.rsl.ru/ru/rsl01006646888?page=2&rotate=0&theme=white>.
38. Ibragimov M. Strengthening of soft soils by grouting. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019;23(4):69–80. (In Russ.)
39. Ibragimov M. N. Design and implementation of soil stabilization by grout injection using hydrofracking technology. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2015;52:100–108. <https://doi.org/10.1007/s11204-015-9313-0>
40. Abbud M. *Geotechnical substantiation of stabilization of foundation settlements by means of injected soil consolidation: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2000. (In Russ.)
41. Bogomolov V. A. *The method of high-pressure injection of cohesive soils in the arrangement and reinforcement of bases and foundations: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. Perm: Perm State Technical University; 2002. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01003228006?ysclid=m704d17gf4667484184>
42. Ermolayev V. A. *Fixing of bases of buildings and structures by the method of hydraulic fracturing at repeated injection: abstract of the dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences*. St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2013. (In Russ.) URL: <https://search.rsl.ru/ru/record/01005543569?ysclid=m704eow4a560690510>.
43. Lomov P. O., Lanis A. L., Grebennikov I. O. Assessment of the deformation characteristics of soil massif reinforced with vertical elements. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023;(3):22–37. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-771-3-22-37>
44. Kononenko D. V., Lichman A. R., Nuzhdin M. L. Laboratory studies of the shape of injection bodies obtained by injection of expanding geopolymer. In: *Aktual'nyye problemy sovremennogo fundamentostroyeniya s uchetom energosberegayushchikh tekhnologiy: sbornik materialov XV Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Penza, 21 May 2024*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2024. P. 19–22. (In Russ.)
45. Ibragimov M. N., Semkin V. V. *Soil consolidation by injection of cement mortars*. Moscow: ASV; 2012. (In Russ.)
46. Kambefor A. *Soil injection. Principles and methods*. Moscow: Energiya; 1971. (In Russ.)
47. Shulyatyev O. A., Mozgacheva O. A. Reduction of foundation settlement by changing the stress-strain state of the soil bedding with injected hardening solution. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2020;26(3):121–148. (In Russ.) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3\(26\)-121-148](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-3(26)-121-148)
48. Pronozin Ya. A., Stepanov M. A., Shuvaev A. N., Davlatov D. N. Interaction of the system of strengthening pile foundations with preliminarily prime rated ground basis of operating facilities. *Bulletin of PNRPU. Construction and Architecture*. 2018;9(3):42–53. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2018.3.05>
49. Mangushev R. A., Garnyk L. V., Trifonova I. I. The influence of protection geotechnical measures on stabilization of settlement of the building in a dangerous condition. *Bulletin of Civil Engineers*. 2016;(4):85–93. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=26673483>.

50. Sakharov I. I. Adaptation of collar technology for reinforcement injection of building foundations. *Rekonstruktsiya gorodov i geotekhnicheskoye stroitel'stvo*. 2000;(2). (In Russ.) URL: <http://georeconstruction.net/journals/02/6/6.htm>.
51. Jaworski G. W., Seed H. B., Duncan J. M. Laboratory study of hydraulic fracturing. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1981;107(6):713–732. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(81\)90537-4](https://doi.org/10.1016/0148-9062(81)90537-4)
52. Mohd Norizam M. S., Nuzul Azam H., Helmi Zulhaidi S., Abdul Aziz A., Nadzrol Fadzil A. Literature review of the benefits and obstacle of horizontal directional drilling. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017;271:012094. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/271/1/012094>
53. Nuzhdin M. L., Nuzhdin L. V. Experimental confirmation of possibility of creating installed form injection bodies in ground base. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2019;(10):101–112. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41831500>.



Информация об авторах

Пронозин Яков Александрович, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, geofond.tgasu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6173-2796>

Сугоняев Иван Владимирович, аспирант, лаборант кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, vanya_sugonyaev1999@mail.ru

Брагарь Елена Петровна, PhD, ассистент кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, bragarep@tyuiu.ru

Кайгородов Михаил Дмитриевич, канд. техн. наук, доцент кафедры строительного производства и геотехники, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, heklerkox@gmail.com

Information about the authors

Yakov A. Pronozin, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Professor in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, geofond.tgasu@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6173-2796>

Ivan V. Sugonyaev, Postgraduate, Laboratory Assistant in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, vanya_sugonyaev1999@mail.ru

Elena P. Bragar, PhD, Assistant in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, bragarep@tyuiu.ru

Mikhail D. Kaigorodov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Construction Production and Geotechnics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, heklerkox@gmail.com

Получена 25 ноября 2024 г., одобрена 10 февраля 2025 г., принята к публикации 20 февраля 2025 г.
Received 25 November 2024, Approved 10 February 2025, Accepted for publication 20 February 2025

Научная статья / Original research article

УДК 697.92:727

<https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-39-51>

EDN: PIWUKL

2.1.3 Теплоснабжение, вентиляция,
кондиционирование воздуха, газоснабжение
и освещение (технические науки)



Влияние периодического проветривания в учебном кабинете на качество воздуха и микроклимат

Д. С. Симонов ✉, А. Ю. Морозов, К. Д. Коновалова, Е. Л. Миськова

Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина,
ул. Мира, 19, Екатеринбург, 620002, Российская Федерация

✉ d.simonov@urfu.ru

Аннотация. Качество воздуха и параметры микроклимата в учебных кабинетах влияют на здоровье и успеваемость обучающихся. Определить расчетом уменьшение концентрации углекислого газа при периодическом проветривании весьма затруднительно. Проведено экспериментальное исследование для оценки влияния проветривания в холодный период года на качество воздуха и параметры микроклимата. Объект исследования – учебный кабинет площадью 55.6 м². В первый день исследования проветривание проводилось перед началом занятий и во время перерывов. Во второй и третий дни режим проветривания определялся обучающимися и преподавателями. Измерение концентрации углекислого газа, температуры и относительной влажности воздуха производилось измерителем качества воздуха, установленным в центре помещения на высоте 1.5 м. В первый день требуемое качество воздуха было зафиксировано на протяжении 16 % учебного времени, допустимое и низкое на протяжении 47 и 37 % соответственно. При этом максимальная концентрация углекислого газа составила 2 639 ppm, и наблюдался неустойчивый тепловой режим с максимальным увеличением температуры на 4.7 °C за 45 мин занятия. Без контроля за режимом проветривания и при закрытой двери в кабинет во время занятий продолжительность учебного времени при низком качестве воздуха увеличилась в 2.2 раза, а максимальная концентрация углекислого газа была выше в 1.3 раза.

Ключевые слова: вентиляция, качество воздуха, микроклимат, относительная влажность, температура, углекислый газ, учебный кабинет

Для цитирования: Симонов Д. С., Морозов А. Ю., Коновалова К. Д., Миськова Е. Л. Влияние периодического проветривания в учебном кабинете на качество воздуха и микроклимат. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):39–51. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-39-51> EDN: PIWUKL

Effect of periodic ventilation in a classroom on air quality and microclimate

Denis S. Simonov ✉, Anton Yu. Morozov, Kristina D. Konovalova, Elizaveta L. Miskova

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, 19 Mira St.,
Yekaterinburg, 620002, Russian Federation

✉ d.simonov@urfu.ru

Abstract. Air quality and microclimate parameters in classrooms impact student health and academic performance. Calculate the precise reduction in carbon dioxide concentration achieved through periodic ventilation is challenging. Therefore, an experimental study was conducted to evaluate the effect of ventilation on air quality and microclimate parameters during the cold season. The research object was a classroom with

an area of 55.6 m². On the first day of the study, ventilation was implemented before the start of classes and during breaks. On the second and third days, the ventilation schedule was determined by the students and lecturers. Carbon dioxide concentration, air temperature and relative humidity were measured using an air quality meter positioned in the center of the room at a height of 1.5 meters. On the first day, the air quality met the required standard for 16% of the teaching time, while it was acceptable and low for 47 and 37% of the time, respectively. The maximum carbon dioxide concentration reached 2639 ppm, and an unstable thermal environment was observed, with a maximum temperature increase of 4.7 °C over a 45-minute class period. Without control over the ventilation schedule and with the classroom door closed during classes, the duration of study time with poor air quality increased by 2.2 times, and the maximum carbon dioxide concentration was 1.3 times higher.

Keywords: ventilation, air quality, microclimate, relative humidity, temperature, carbon dioxide, classroom

For citation: Simonov D. S., Morozov A. Yu., Konovalova K. D., Miskova E. L. Effect of periodic ventilation in a classroom on air quality and microclimate. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):39–51. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-39-51>



1. Введение / Introduction

Качество внутреннего воздуха и параметры микроклимата являются одними из основных показателей, определяющими состояние внутренней среды в помещениях, в том числе в учебных кабинетах образовательных организаций. В работе [1] было отмечено, что исследования отечественных ученых преимущественно посвящены вопросам из области вентиляции зданий промышленного назначения, однако в последнее время вопросы организации воздухообмена в зданиях общественного назначения привлекают все большее внимание как в России [1–4], так и в других странах [5]. Отдельно стоит отметить мировую тенденцию к увеличению числа исследований воздушной среды помещений образовательных организаций [5, 6].

Обзор [7] показал, что неудовлетворительное качество внутреннего воздуха в учебных кабинетах может оказывать отрицательное влияние на успеваемость обучающихся, а также приводить к увеличению числа пропущенных по болезни занятий. Во время исследований в кабинетах школ различных стран было установлено, что в ряде случаев фактические уровни концентрации углекислого газа (далее CO₂) превышают рекомендуемые как при естественной [8, 9], так и при механической вентиляции [9, 10]. При этом отдельно можно выделить вопросы равномерности распределения концентрации CO₂ по объему помещения и размещения средств измерения [11].

Дополнительно к неудовлетворительному качеству воздуха в учебных кабинетах могут устанавливаться высокие температуры, в том числе и в холодный период года в регионах с низкими расчетными температурами наружного воздуха [6, 12].

При исследовании теплового комфорта детей в начальных школах Великобритании [13] установлено, что дети перегреваются быстрее взрослых и комфортная температура в отопительный период для детей ниже, чем для взрослых на 2.9 °C. Анализируя связь между температурой в учебных кабинетах и успеваемостью учащихся в школах, авторы работы [14] сделали вывод, что при снижении температуры воздуха в учебном кабинете с 30 до 20 °C можно ожидать повышения эффективности занятий на 20 %. Недавние исследования [15], проведенные в восьми учебных кабинетах двух новых начальных школ Великобритании, показали, что в большей части кабинетов наблюдалось превышение требуемой температуры внутреннего воздуха на протяжении более 40 % учебного времени.

Таким образом, даже в развитых странах качество воздуха и микроклимат в учебных кабинетах часто бывают неудовлетворительными. Стоит отметить, что часть фонда зданий образовательных организаций как в России, так и в других странах не оборудована системами приточно-вытяжной механической вентиляции.

Исследования и разработка мероприятий по обеспечению требуемых параметров микроклимата и качества воздуха в учебных кабинетах являются актуальной задачей, особенно с учетом социально-экономического аспекта [16].

Цель настоящего исследования – оценить влияние периодического естественного проветривания на качество воздуха и параметры микроклимата в учебном кабинете здания образовательной организации высшего образования.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Для учебных кабинетов характерна нестационарность процессов. В зависимости от способа организации воздухообмена концентрация CO_2 в течение учебного дня изменяется по различным закономерностям.

При наличии в помещении постоянного воздухообмена, людей (источника выделений CO_2) и применении допущения о равномерном распределении CO_2 по объему помещения уравнение газового баланса в дифференциальной форме имеет вид [17]:

$$M_{\text{CO}_2} dt + L_{\text{in}} C_{\text{in}} dt - L_i C dt - V dC = 0, \quad (1)$$

где M_{CO_2} – интенсивность поступления CO_2 , единиц массы в 1 ч;

L_{in} – расход приточного воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

C_{in} – концентрация CO_2 в приточном воздухе, единиц массы в 1 м^3 воздуха;

L_i – расход удаляемого воздуха, $\text{м}^3/\text{ч}$;

C – концентрация CO_2 в помещении, единиц массы в 1 м^3 воздуха;

V – объем помещения, м^3 .

При равенстве расходов приточного и удаляемого воздуха уравнение (1) преобразуется к виду [17]:

$$\frac{L}{V} t = -\ln \frac{\frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - C}{\frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - C_0}, \quad (2)$$

где L – величина воздухообмена, $\text{м}^3/\text{ч}$;

C_0 – начальная концентрация CO_2 в помещении, единиц массы в 1 м^3 воздуха;

t – время, ч.

Из формулы (2) можно получить зависимость для расчета изменения концентрации CO_2 [17]:

$$C = \frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - \left(\frac{M_{\text{CO}_2}}{L} + C_{\text{in}} - C_0 \right) e^{-t \frac{L}{V}}. \quad (3)$$

В случае отсутствия воздухообмена в учебном кабинете во время проведения занятий (например, системы вентиляции не предусмотрены или выключены) уравнение (1) примет следующий вид [17]:

$$M_{\text{CO}_2} dt - V dC = 0. \quad (4)$$

Для такого режима изменение концентрации CO_2 можно определить по зависимости [17]:

$$C = C_0 + \frac{M_{\text{CO}_2}}{V} t. \quad (5)$$

Периодическое проветривание учебного кабинета за счет открытия окон осуществляется при отсутствии обучающихся (единственного источника выделений CO_2) и тогда изменение концентрации CO_2 описывается зависимостью:

$$C = C_{in} + (C_0 - C_{in})e^{-\frac{L}{V}}. \quad (6)$$

А величину воздухообмена при проветривании можно определить из уравнения:

$$L = \frac{V}{t} \ln \frac{C_0 - C_{in}}{C - C_{in}}. \quad (7)$$

Таким образом, при стратегии вентиляции, основанной на применении периодического проветривания во время перерывов и отсутствии организованного воздухообмена во время занятий (полагая незначительность величины расхода приточного воздуха, поступающего за счет инфильтрации через ограждающие конструкции), изменение концентрации CO_2 в течение учебного дня описывается формулами (5) и (6).

Однако если увеличение концентрации CO_2 во время занятия можно определить расчетом, то рассчитать снижение концентрации во время проветривания на перерыве весьма затруднительно: величина воздухообмена при естественном проветривании зависит от большого количества изменяющихся параметров (например, от температуры наружного воздуха, скорости и направления ветра, внутренних аэродинамических связей в здании и др.).

Для оценки изменения концентрации CO_2 , температуры и относительной влажности внутреннего воздуха при периодическом проветривании было проведено экспериментальное исследование.

Исследование проводилось в учебном кабинете здания института строительства и архитектуры Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина в городе Екатеринбурге. Площадь помещения 55.6 м², высота 3.23 м, объем 179.6 м³. Кабинет расположен на четвертом (верхнем) этаже здания, имеет одну наружную стену с тремя окнами, ориентированными на запад. Под окнами установлены приборы отопления с термостатическими клапанами и термостатическими элементами. Учебный кабинет предназначен для проведения лекционных и практических занятий, оснащен компьютером с двумя мониторами, экраном и другими мультимедийными средствами. Выбор данного учебного кабинета обусловлен тем, что в 2023–2024 гг. в нем была смонтирована система приточно-вытяжной механической общеобменной вентиляции и запланированы исследования в области обеспечения качества воздуха и параметров микроклимата при различных способах организации воздухообмена (в настоящем исследовании система не использовалась). Общий вид учебного кабинета приведен на рис. 1.

Для проведения исследования был выбран холодный период года, так как в городе Екатеринбурге именно на это время приходится большая часть учебного года. Также при низких температурах наружного воздуха можно ожидать большей величины воздухообмена.

Измерение концентрации CO_2 , температуры и относительной влажности воздуха производилось измерителем качества воздуха ИКВ-8 П (O_2 , CO_2) (производитель – АО «Эксис», Россия), установленным в центре помещения на высоте 1.5 м. Измеритель качества воздуха имеет свидетельство об утверждении типа средств измерений и зарегистрирован в Государственном реестре средств измерений Российской Федерации под номером 84997-22. Предел допускаемой основной абсолютной погрешности: при измерении температуры ± 0.2 °C, при измерении относительной влажности ± 2 %, при измерении концен-



Рис. 1. Учебный кабинет (фото авторов)
Fig. 1. Classroom (authors' photo)

трации $\text{CO}_2 \pm (30 + 0.03 C_{\text{вх}})$ ppm ($C_{\text{вх}}$ – объемная доля CO_2 на входе измерителя, ppm). Время прогрева измерителя не более 300 сек. Запись измерений производилась во внутреннюю память средства измерения с интервалом в 60 сек. Измерения выполнялись однократно, что обусловлено невозможностью их повторения при нестационарных процессах. Согласно рекомендациям по метрологии Р 50.2.038-2004¹, при однократных измерениях полагают, что распределение вероятностей возможных значений величины не противоречит нормальному распределению, а при определении доверительных границ или расширенной неопределенности до уровня доверия P результата измерения принимают вероятность равную 0.95.

Различия в изменении измеряемых параметров во время перемен при разных режимах проветривания были проверены на значимость с помощью U -критерия Манна-Уитни.

Исследование проводилось во время занятий (таблица 1) бакалавров 4 года обучения (возраст 20–23 года) на протяжении трех дней: 4 декабря 2024 г. (далее – первый день), 11 декабря 2024 г. (далее – второй день), 18 декабря 2024 г. (далее – третий день).

В первый день исследования проветривание учебного кабинета осуществлялось перед занятиями и во время перерывов за счет открытия откидывающихся створок двух окон (для интенсификации воздухообмена) при закрытой двери и отсутствии людей. Продолжительность определялась на основании требований СанПин 1.2.3685-21². Измеритель качества воздуха был включен с 9:00 до 16:00 ч. С 9:35 до 10:00 ч было проведено проветривание перед занятиями. Во время малых перерывов (5–15 мин по расписанию) проветривание длилось не более 5 мин, а на большом перерыве – 32 мин (с 13:27 до 13:59), что на 7 мин больше установленного СанПин 1.2.3685-21. После каждого проветривания до начала занятий дверь и окна в кабинете были закрыты, люди отсутствовали. Перерывы продолжительностью 5 мин были увеличены для прогрева помещения после проветривания.

Таблица 1. Расписание занятий
Table 1. Class schedule

Занятие	Время занятия, ч	Перерыв, мин	Количество обучающихся на занятии, чел.			Площадь кабинета на 1 обучающегося, м ² /чел.		
			Первый день	Второй день	Третий день	Первый день	Второй день	Третий день
№ 1	10:15–11:00	5	9	21	10	6.2	2.6	5.6
№ 2	11:05–11:45	15	10	до 21	11	5.6	–	5.1
№ 3	12:00–12:45	5	14	14	17	4.0	4.0	3.3
№ 4	12:50–13:30	45	15	до 14	21	3.7	–	2.6
№ 5	14:15–15:00	5	22	15	13	2.5	3.7	4.3
№ 6	15:05–15:45	–	22	15	13	2.5	3.7	4.3

¹ Р 50.2.028-2004 Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые однократные. Оценивание погрешностей и неопределенности результата измерений = State system for ensuring the uniformity of measurements. Direct single measurements. Estimation of errors and uncertainty of measurements result: внесены Управлением метрологии Госстандарта России: утверждены и введены в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 27 октября 2004 г. № 43-ст. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037562> (дата обращения: 28.12.2024).

² СанПиН 1.2.3685-21 Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: утверждены постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28 января 2021 г. № 2. URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115?marker=6560IO> (дата обращения: 28.12.2024).

Таблица 2. Классификация качества воздуха
Table 2. Air quality classification

Качество воздуха в помещении	Содержание CO ₂ , ppm
Высокое	800 и менее
Среднее	800–1 000
Допустимое	1 000–1 400
Низкое	1 400 и более

Таблица 3. Оптимальные и допустимые нормы температуры и относительной влажности
Table 3. Optimal and permissible temperature and relative humidity standards

Тип помещения	Температура воздуха, °C	Относительная влажность, %
	оптимальная / допустимая	оптимальная / допустимая
Учебный кабинет	19–21 / 18–23	45–30 / не более 60

Во второй и третий дни исследования режим проветривания и нахождения людей в помещении не регламентировался (обучающиеся и преподаватели самостоятельно определяли необходимость и технологию проветривания). Измеритель качества воздуха включался за 15–30 мин до начала занятий и выключался непосредственно после их завершения. При этом во второй день на занятиях № 2 и № 4 дверь в учебный кабинет была открыта, обучающиеся свободно перемещались по помещению и могли его покинуть. На большом перерыве дверь была закрыта и люди в помещении отсутствовали.

При обработке результатов исследования классификация качества воздуха (таблица 2) в помещении выполнена согласно ГОСТ 30494-2011³ на основании содержания CO₂ сверх его содержания в наружном воздухе. При этом за уровень CO₂ в наружном воздухе принята среднегодовая концентрация для большого города, приведенная в ГОСТ 30494-2011.

Допустимые и оптимальные нормы температуры и относительной влажности внутреннего воздуха в холодный период года (таблица 3) приняты согласно ГОСТ 30494-2011 для помещений второй категории (помещения, в которых люди заняты умственным трудом и учебой).

Температура наружного воздуха, скорость и направление ветра в дни исследования (таблица 4) взяты по данным ФГБУ «Гидрометцентр России»⁴.

Таблица 4. Параметры наружного воздуха
Table 4. Outdoor air parameters

День исследования	Температура наружного воздуха, °C	Средняя скорость, м/с, и направление ветра
Первый	–2.5	4 (запад.)
Второй	–5.7	4 (запад.)
Третий	–7.6	2 (юго-вост.)

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Результаты измерений в первый день исследования представлены на рис. 2 (концентрация CO₂) и рис. 3 (температура и относительная влажность).

Из графика изменения концентрации CO₂ в первый день видно, что после проветривания на момент начала занятий концентрация составила 490 ppm и на протяжении первых 25 мин занятия № 1 в учебном кабинете было зафиксировано высокое и среднее качество воздуха (при удельной площади помещения на 1 обучающегося 5.6 м²/чел). Однако в связи с непродолжительностью проветривания во время малых перерывов к концу занятий № 3 и № 4 качество воздуха было низким. На

³ ГОСТ 30494-2011 Межгосударственный стандарт. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях = Residential and public buildings. Microclimate parameters for indoor enclosures. Протокол № 39 от 8 декабря 2011 г. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200095053> (дата обращения: 28.12.2024).

⁴ Архив фактической погоды ФГБУ «Гидрометцентр России». URL: <https://meteoinfo.ru/archive-pogoda> (дата обращения: 25.12.2024).

занятиях № 5 и № 6 присутствовало большее количество людей (удельная площадь помещения на 1 обучающегося 2.5 м²/чел), и через 22 мин после начала занятия № 5 и до конца занятия № 6 качество воздуха было низким при максимальной концентрации CO₂ 2 639 ppm.

График на рис. 3 показывает, что периодическое проветривание приводит к колебаниям температуры и относительной влажности воздуха в учебном кабинете. Несмотря на наличие устройств для регулирования теплоотдачи отопительных приборов, в начале первого дня в помещении установилась температура 22.7 °С (верхняя граница интервала допустимых температур), которая в результате проветривания уменьшилась до 17.3 °С, а к моменту начала занятия № 1 увеличилась до 20.3 °С. До большого перерыва во время каждого из занятий за счет поступления теплоты от системы отопления, людей, освещения и оборудования температура воздуха увеличивалась на 2.5–3.8 °С, а при проветривании уменьшалась на 2.4–3.6 °С. Максимальное изменение температуры наблюдалось во время занятия № 5 и составило 4.7 °С за 45 мин. Максимальная температура 25.3 °С была зафиксирована в конце занятия № 6. Аналогичным образом изменялась и относительная влажность: уменьшалась при проветривании и увеличивалась во время занятий за счет поступлений влаги от людей, при этом всегда оставаясь в интервале допустимых или оптимальных величин.

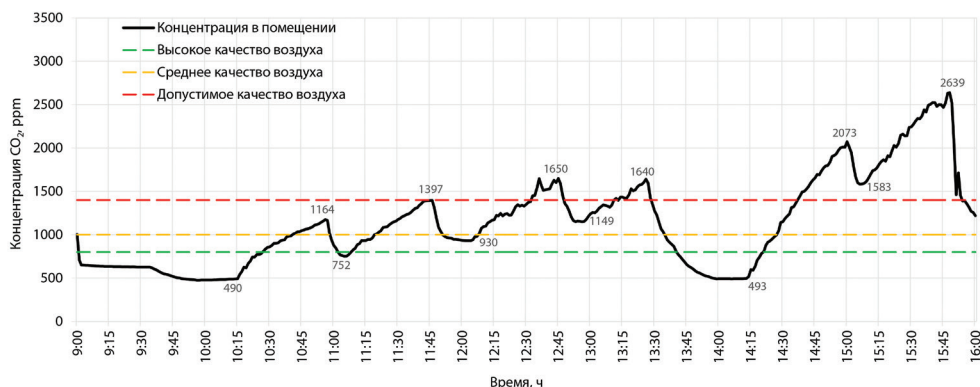


Рис. 2. Концентрация CO₂ в учебном кабинете (первый день)
(график построен авторами)

Fig. 2. Classroom CO₂ concentration on Day 1 (graph by the authors)

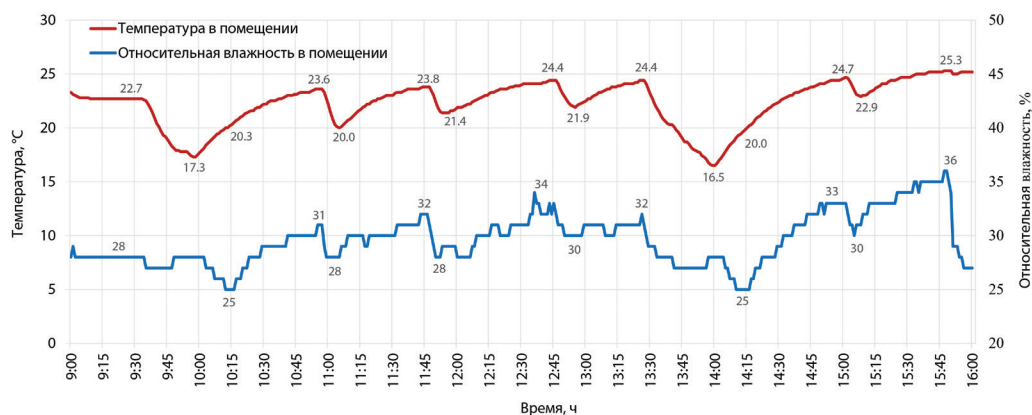


Рис. 3. Температура и относительная влажность
в учебном кабинете (первый день) (график построен авторами)

Fig. 3. Classroom temperature and relative humidity on Day 1 (graph by the authors)

Во второй день исследования концентрация CO_2 (рис. 4) уже через 3 мин после начала занятий превысила величину, соответствующую высокому качеству воздуха, а через 8 мин соответствующую среднему. В течение большей части учебного дня концентрация CO_2 отвечала допустимому и низкому качеству воздуха. Увеличение концентрации в 13:00 ч можно объяснить непродолжительным нахождением обучающихся непосредственно у средства измерения. Во время занятий № 2 и № 4 наблюдалось изменение концентрации CO_2 за счет воздухообмена через открытую дверь. Однако при такой схеме проветривания можно говорить только об уменьшении концентрации, но не об общем улучшении качества воздуха. Объясняется это тем, что воздух, поступающий в учебный кабинет из коридора, может содержать различные загрязняющие вещества (например, от отделочных материалов, людей).

Анализ теплового баланса [12] показал, что за счет поступлений теплоты от внутренних источников в учебных кабинетах могут устанавливаться высокие температуры воздуха в холодный период года. По графику изменения температуры (рис. 5) видно, что за время занятия № 1 температура внутреннего воздуха увеличилась на 2.5°C до 24.4°C и до конца учебного дня была выше допустимой (температура 23°C была зафиксирована только во время большого перерыва). Относительная влажность на протяжении дня находилась в допустимом или оптимальном диапазонах, уменьшаясь при открытой двери и увеличиваясь при закрытой.

Во второй день окно открывалось только один раз в 15:05 на непродолжительный период.

На протяжении третьего дня обучающиеся и преподаватели ни разу не проветривали помещение (окна оставались закрытыми, дверь открывалась только во время перерывов). Концентрация CO_2 (рис. 6) через 16 мин после начала занятий превысила величину, соответствующую высокому качеству воздуха, а через 55 мин соответствующую допустимому, и до конца учебного дня качество воздуха оставалось на низком уровне. Максимальная концентрация 3 314 ppm была зафиксирована в конце занятия № 4.

Во второй и третий дни исследования классификация качества воздуха по концентрации CO_2 должна приниматься с ограничениями по причине того, что перед началом занятий проветривание наружным воздухом не проводилось и в помещении могли накопиться загрязняющие вещества (например, от строительных материалов, мебели и людей, которые находились в помещении в предшествующий день).

Температура внутреннего воздуха (рис. 7) через 28 мин после начала занятий увеличилась до 23°C и в дальнейшем была выше допустимых величин. Относительная влажность (рис. 7) на протяжении большей части учебного дня находилась в оптимальном диапазоне. Однако увеличение относительной влажности только за счет поступлений влаги от людей также говорит об увеличении содержания и других выделяемых людьми загрязнителей (например, запахов или вирусов).

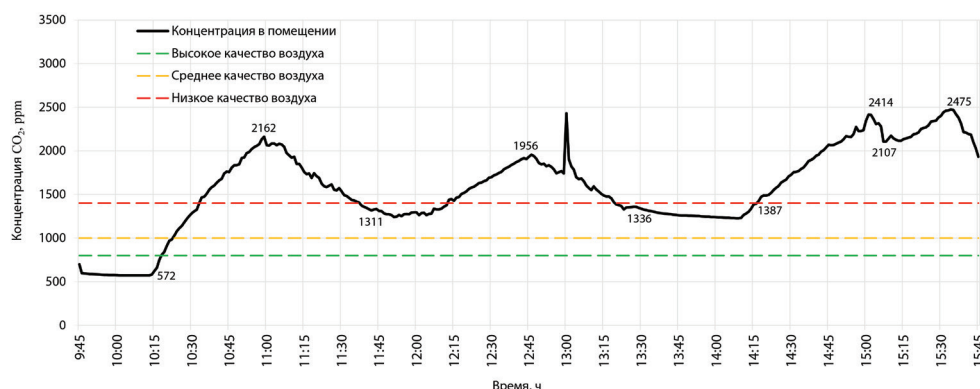


Рис. 4. Концентрация CO_2 в учебном кабинете (второй день) (график построен авторами)
Fig. 4. Classroom CO_2 concentration on Day 2 (graph by the authors)

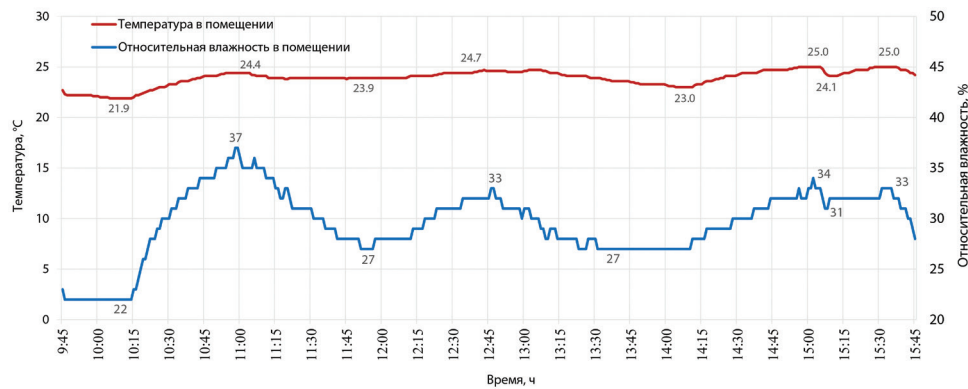


Рис. 5. Температура и относительная влажность в учебном кабинете (второй день) (график построен авторами)

Fig. 5. Classroom temperature and relative humidity on Day 2 (graph by the authors)

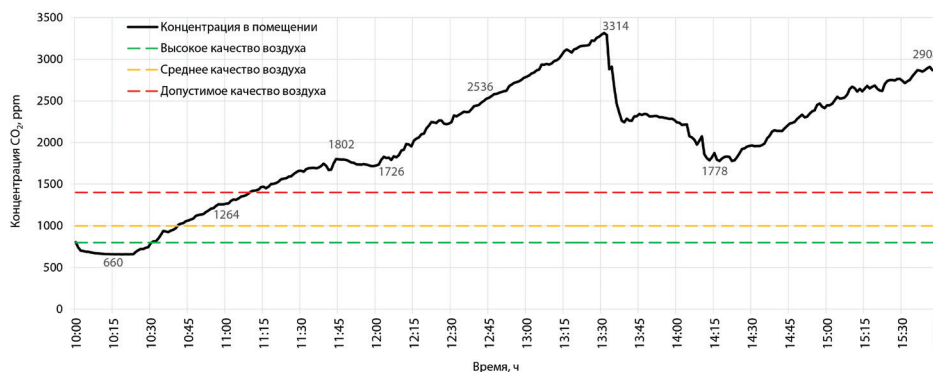


Рис. 6. Концентрация CO₂ в учебном кабинете (третий день) (график построен авторами)

Fig. 6. Classroom CO₂ concentration on Day 3 (graph by the authors)

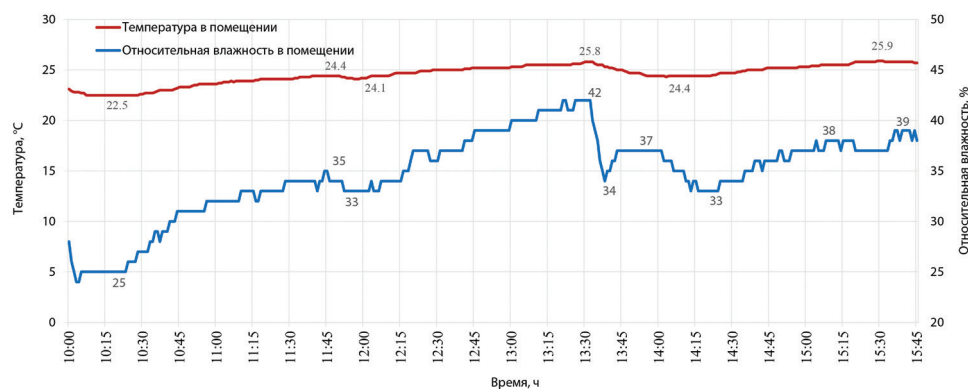


Рис. 7. Температура и относительная влажность в учебном кабинете (третий день) (график построен авторами)

Fig. 7. Classroom temperature and relative humidity on Day 3 (graph by the authors)

Полученные в результате исследования данные о неудовлетворительном микроклимате и качестве воздуха в учебной аудитории согласуются с результатами других исследований. Исследование [18], проведенное на базе четырех организаций высшего профессионального образования в

городе Уфе, показало низкое качество воздуха в каждом третьем учебном кабинете. В работе [19] приведены данные о высоких температурах воздуха и низкой относительной влажности в помещении школы, а также об увеличении общего микробного числа при недостаточном проветривании.

Погрешность измерений приведена в таблице 5.

Таблица 5. Погрешность измерений
Table 5. Measurement error

Параметр	Диапазон относительной погрешности результатов измерений, %	Наименьший результат измерений	Наибольший результат измерений
Концентрация CO ₂	от 3.9 до 9.2	(490 ± 45) ppm; P = 0.95	(3 314 ± 129) ppm; P = 0.95
Температура	от 0.8 до 1.2	(16.5 ± 0.2) °C; P = 0.95	(25.9 ± 0.2) °C; P = 0.95
Относительная влажность	от 4.8 до 9.1	(22 ± 2) %; P = 0.95	(42 ± 2) %; P = 0.95

Сравнительный анализ изменений концентрации CO₂, температуры и относительной влажности за время малых перерывов при проветривании наружным воздухом (первый день) и без проветривания (третий день) с использованием U-критерия Манна-Уитни показал статистическую значимость различий (при $p \leq 0.01$).

К ограничениям исследования можно отнести то, что эффективность естественного проветривания может варьироваться. Однако концентрации CO₂ в учебном кабинете, зафиксированные в первый день исследования во время проветривания перед началом занятия и на большом перерыве, были близки к среднегодовой концентрации в наружном воздухе большого города, приведенной в ГОСТ 30494-2011.

В дальнейшем авторами запланированы исследования в области обеспечения качества воздуха в учебных кабинетах с применением систем механической приточно-вытяжной вентиляции при различных величинах воздухообменов и схемах воздухораспределения.

4. Заключение / Conclusions

1. При периодическом проветривании наружным воздухом требуемое качество воздуха (высокое или среднее, согласно ГОСТ 30494-2011) было зафиксировано на протяжении 16 % учебного времени, допустимое и низкое качество на протяжении 47 и 37 % соответственно. Максимальная концентрация CO₂ составила 2 639 ppm. Несмотря на предшествующие длительные проветривания, в течение занятий № 1 и № 5 концентрация CO₂ превысила 1000 ppm, что свидетельствует о невозможности обеспечения требуемого качества воздуха при текущей заполняемости учебного кабинета только за счет проветривания во время перерывов. Был зафиксирован неустойчивый тепловой режим с максимальным увеличением температуры на 4.7 °C за 45 мин занятия.
2. Без контроля за режимом проветривания и при закрытой двери в кабинет во время занятий требуемое качество воздуха было зафиксировано на протяжении 10 % учебного времени, допустимое и низкое качество на протяжении 9 и 81 % соответственно. Максимальная концентрация CO₂ составила 3 314 ppm. Таким образом, в режиме без проветривания продолжительность учебного времени при низком качестве воздуха была больше в 2.2 раза, а максимальная концентрация CO₂ была выше в 1.3 раза. Стоит отметить, что обучающиеся и преподаватели занимали пассивную позицию относительно текущего качества воздуха, и окна в течение дня не открывались.
3. Во все дни исследования перед началом занятий были зафиксированы температуры внутреннего воздуха в диапазоне 21.9–22.7 °C, что выше оптимальных величин. При этом температура воздуха была выше допустимых значений на протяжении 95 % учебного времени во второй день исследования и 93 % в третий день.

4. Относительная влажность во время исследования составляла 22–42 %, что соответствует допустимому диапазону.
5. Результаты исследования могут быть использованы для улучшения качества воздуха и микроклимата при эксплуатации зданий образовательных организаций, не оборудованных системами приточно-вытяжной механической общеобменной вентиляции. Можно рекомендовать:
 - продолжительность проветриваний согласно требованиям СанПин 1.2.3685-21 с контролем за температурой воздуха (исследование показало, что температура воздуха после проветривания может быть ниже допустимой и перед входом обучающихся в кабинет необходимо обеспечить прогрев помещения);
 - проветривание помещений перед занятиями для удаления загрязняющих выделений, накопившихся в помещении в ночное время;
 - организацию дополнительных перерывов между занятиями в кабинете для проведения интенсивного проветривания (исследование показало, что продолжительности проветривания на малых перерывах может быть недостаточно);
 - установку в кабинетах средств измерения для объективного контроля за концентрацией CO₂ и температурой воздуха во время занятий и при проветривании;
 - проведение работ по повышению осведомленности обучающихся и преподавателей в части влияния состояния внутренней среды на здоровье и успеваемость;
 - контроль за настройками термостатических элементов приборов отопления для поддержания температуры воздуха в пределах нормируемого диапазона и сокращения расхода теплоты на отопление.

Требуются дальнейшие исследования качества воздуха и параметров микроклимата в учебных кабинетах при различных способах организации и величинах воздухообмена.



Вклад авторов. Авторы сделали эквивалентный 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. Денисихина Д. М. Численное исследование закономерностей распределения CO₂ в общественных зданиях. *Инновации и инвестиции*. 2023;(5):368–372. URL: <https://www.innovazia.ru/archive/39071/>.
2. Мансуров Р. Ш., Мухин А. И., Костин В. И., Омельченко Д. А., Гавриленко В. А., Соколов Ю. Г. Воздушный режим помещений небольшого объема общественных зданий при нестационарном характере работы. *Известия высших учебных заведений. Строительство*. 2023;(9):46–57. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-777-9-46-57>
3. Уляшева В. М., Иванова Ю. В., Аншукова Е. А. Численное моделирование микроклимата в торговых помещениях. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(9):64–67. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=9&year=2024>.
4. Дацюк Т. А., Гримитлин А. М., Таурит В. Р., Иванова Ю. В. Численное моделирование вентиляции спан-центра. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(10):50–52. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.
5. Sadrizadeh S., Yao R., Yuan F., Awbi H., Bahnfleth W., Bi Ya. et al. Indoor air quality and health in schools: a critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022;57:104908. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104908>
6. Wargocki P., Wyon D. P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013;59:581–589. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>
7. Симонов Д. С., Морозов А. Ю., Коновалова К. Д., Миськова Е. Л. Обзор результатов исследований влияния качества воздуха на обучение и посещаемость. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(10):54–56. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.

8. Andamon M. M., Rajagopalan P., Woo J. Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO₂ concentration measurements. *Building and Environment*. 2023;237:110313. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110313>
9. Cabovská B., Bekö G., Teli D., Ekberg L., Dalenbäck Ja. O., Wargocki P. et al. Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*. 2022;226:109744. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109744>
10. Ding E., Zhang D., Hamida A., García-Sánchez C., Jonker L., De Boer A. R. et al. Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and prevention measures. *Building and Environment*. 2023;229(4):109922. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109922>
11. Zhang D., Ding E., Bluysen P. M. Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO₂ monitoring. *Indoor and Built Environment*. 2022;31(4):1107–1126. <https://doi.org/10.1177/1420326X211058743>
12. Симонов Д. С., Морозов А. Ю., Жилина Т. С. Воздухообмен и воздухораспределение в учебных кабинетах образовательных организаций. *Сантехника. Отопление. Кондиционирование*. 2024;(7):62–65. URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=7&year=2024>.
13. Korsavi S. S., Montazami A. Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons. *Energy and Buildings*. 2020;214:109857. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109857>
14. Wargocki P., Porras-Salazar J. A., Contreras-Espinoza S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*. 2019;157:197–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>
15. Mohamed S., Rodrigues L., Omer S., Calautit J. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. *Energy and Buildings*. 2021;250:111291. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111291>
16. Wargocki P., Foldbjerg P., Eriksen K. E., Videbæk L. E. Socio-economic consequences of improved indoor air quality in Danish primary schools. In: *Indoor Air 2014. The 13th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate. Hong Kong, July 7 to 12, 2014. Vol. 5*. 2014. P. 953–958.
17. Каменев П. Н., Тертичник Е. И. *Вентиляция*. Москва: АСВ; 2008. 624 с. URL: <https://djvu.online/file/SYF0pFbiklm8F?ysclid=m88oek1oz901811982>
18. Горбаткова Е. Ю., Ахмадуллина Х. М., Ахмадуллин У. З., Зулькарнаев Т. Р., Хуснутдинова З. А., Мануйлова Г. Р. Гигиеническая оценка состава воздушной среды студенческих аудиторий. *Гигиена и санитария*. 2022;101(4):453–458. <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-4-453-458>
19. Исаева Г. Ш., Зиятдинов В. Б., Габидуллина С. Н. Гигиенический и микробиологический мониторинг воздушной среды в начальной школе. *Здравоохранение Российской Федерации*. 2016;60(2):83–88. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25717378>.

References

1. Denisikhina D. M. Numerical simulation of CO₂ distribution in public buildings. *Innovation & Investment*. 2023;(5):368–372. (In Russ.) URL: <https://www.innovazia.ru/archive/39071/>.
2. Mansurov R. Sh., Mukhin A. I., Kostin V. I., Omelchenko D. A., Gavrilenko V. A., Sokolov Yu. G. The air regime of the premises of a small volume of public buildings with a non-stationary nature of work. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2023;(9):46–57. (In Russ.) <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-777-9-46-57>
3. Ulyasheva V. M., Ivanova Yu. V., Anshukova E.A. Numerical simulation of the microclimate in commercial premises. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(9):64–67. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=9&year=2024>.
4. Datsyuk T. A., Grimitlin A. M., Taurit V. R., Ivanova Yu. V. Numerical simulation of spa ventilation. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(10):50–52. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.
5. Sadrizadeh S., Yao R., Yuan F., Awbi H., Bahnfleth W., Bi Ya. et al. Indoor air quality and health in schools: a critical review for developing the roadmap for the future school environment. *Journal of Building Engineering*. 2022;57:104908. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2022.104908>
6. Wargocki P., Wyon D. P. Providing better thermal and air quality conditions in school classrooms would be cost-effective. *Building and Environment*. 2013;59:581–589. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2012.10.007>
7. Simonov D. S., Morozov A. Yu., Konovalova K. D., Miskova E. L. Review of research findings on the impact of air quality on learning and attendance. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(10):54–56. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=10&year=2024>.
8. Andamon M. M., Rajagopalan P., Woo J. Evaluation of ventilation in Australian school classrooms using long-term indoor CO₂ concentration measurements. *Building and Environment*. 2023;237:110313. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110313>
9. Cabovská B., Bekö G., Teli D., Ekberg L., Dalenbäck Ja. O., Wargocki P. et al. Ventilation strategies and indoor air quality in Swedish primary school classrooms. *Building and Environment*. 2022;226:109744. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109744>

10. Ding E., Zhang D., Hamida A., García-Sánchez C., Jonker L., De Boer A. R. et al. Ventilation and thermal conditions in secondary schools in the Netherlands: Effects of COVID-19 pandemic control and prevention measures. *Building and Environment*. 2023;229(4):109922. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2022.109922>
11. Zhang D., Ding E., Bluyssen P. M. Guidance to assess ventilation performance of a classroom based on CO₂ monitoring. *Indoor and Built Environment*. 2022;31(4):1107–1126. <https://doi.org/10.1177/1420326X211058743>
12. Simonov D. S., Morozov A. Yu., Zhilina T. S. Air exchange and air distribution in classrooms. *Plumbing. Heating. Air-conditioning*. 2024;(7):62–65. (In Russ.) URL: <https://www.c-o-k.ru/archive-cok?num=7&year=2024>.
13. Korsavi S. S., Montazami A. Children's thermal comfort and adaptive behaviours; UK primary schools during non-heating and heating seasons. *Energy and Buildings*. 2020;214:109857. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2020.109857>
14. Wargocki P., Porras-Salazar J. A., Contreras-Espinoza S. The relationship between classroom temperature and children's performance in school. *Building and Environment*. 2019;157:197–204. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2019.04.046>
15. Mohamed S., Rodrigues L., Omer S., Calautit J. Overheating and indoor air quality in primary schools in the UK. *Energy and Buildings*. 2021;250:111291. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2021.111291>
16. Wargocki P., Foldbjerg P., Eriksen K. E., Videbæk L. E. Socio-economic consequences of improved indoor air quality in Danish primary schools. In: *Indoor Air 2014. The 13th Conference of the International Society of Indoor Air Quality and Climate. Hong Kong, July 7 to 12, 2014. Vol. 5*. 2014. P. 953–958.
17. Kamenev P. N., Tertichnik E. I. *Ventilation*. Moscow: ASV; 2008. (In Russ.). URL: <https://djvu.online/file/SYF0pFbiklm8F?ysclid=m88oek1oz901811982>
18. Gorbatkova E. Yu., Akhmadullina Kh. M., Ahmadullin U. Z., Zulkarnaev T. R., Husnutdinova Z. A., Manuilova G. R. Hygienic assessment of the air environment of student classrooms. *Hygiene and Sanitation*. 2022;101(4):453–458. (In Russ.) <https://doi.org/10.47470/0016-9900-2022-101-4-453-458>
19. Isaeva G. Sh., Ziatdinov V. B., Gabidullina S. N. The hygienic and microbiological monitoring of air in grade school. *Health Care of the Russian Federation*. 2016;60(2):83–88. (In Russ.) URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=25717378>.



Информация об авторах

Симонов Денис Сергеевич, аспирант, старший преподаватель кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, d.simonov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2434-5866>

Морозов Антон Юрьевич, канд. техн. наук, доцент кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, anton.morozov@urfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9772-6726>

Коновалова Кристина Дмитриевна, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, grinovich.msi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0466-3794>

Миськова Елизавета Леонидовна, магистрант кафедры теплогазоснабжения и вентиляции, Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Российская Федерация, lizaveta_mel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6957-4157>

Information about the authors

Denis S. Simonov, Postgraduate, Senior Lecturer in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, d.simonov@urfu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2434-5866>

Anton Yu. Morozov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, anton.morozov@urfu.ru, <https://orcid.org/0009-0001-9772-6726>

Kristina D. Konovalova, Graduate Student in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russia, grinovich.msi@gmail.com, <https://orcid.org/0009-0006-0466-3794>

Elizaveta L. Miskova, Graduate Student in the Department of Heat and Gas Supply and Ventilation, Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Yekaterinburg, Russian Federation, lizaveta_mel@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0004-6957-4157>

Получена 11 января 2025 г., одобрена 12 февраля 2025 г., принята к публикации 18 февраля 2025 г.

Received 11 January 2025, Approved 12 February 2025, Accepted for publication 18 February 2025

Научная статья / Original research article
УДК 614.841.33 + 666.946.6
<https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-52-66>
EDN: PPUZMN

2.1.1 Строительные конструкции,
здания и сооружения (технические науки)



Аппроксимация решения линейной задачи теплопроводности при одностороннем нагреве бетона в условиях стандартного температурного режима пожара

А. Г. Тамразян¹, В. Р. Мешков², В. С. Геращенко^{1, 3} ✉, А. С. Гришин³

¹ Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, ул. Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

³ АО «Атомэнергопроект», ул. Бакунинская, 7, стр. 1, Москва, 105005, Российская Федерация

✉ geraschenko_vs@aep.ru



Аннотация. Для расчетной оценки предела огнестойкости железобетонных конструкций нужно знать, как распределяется температура по бетону в поперечном сечении элемента под воздействием стандартного температурного режима пожара. Известные приближенно-аналитические методики расчета опираются на классическое решение задачи теплопроводности при постоянной температуре поверхности. Авторами построена степенная аппроксимация стандартной температурной кривой пожара, которая позволяет получить приближенно-аналитическое решение задачи при изменении температуры поверхности тела в соответствии с режимом стандартного пожара. Цель работы заключалась в получении формулы, удобной для инженерных теплотехнических расчетов и применимой для бетонов с произвольными теплофизическими характеристиками. Полученная формула с достаточной точностью описывает температуру в любой точке тела в заданный момент времени. Приведено сравнение с решением, полученным высокоточным численным моделированием (ANSYS, MATLAB), для разных типов бетона. Предлагаемая аппроксимация не содержит специальных функций, поэтому ее использование не требует наличия каких-либо компьютерных программ. Точность, простота и универсальность позволяют рекомендовать данную формулу к использованию в инженерных расчетах на огнестойкость для определения температур прогрева бетона в зависимости от времени при стандартном огневом воздействии.

Ключевые слова: стандартный температурный режим пожара, стандартная температурная кривая пожара, огнестойкость железобетонных конструкций, расчет температуры

Для цитирования: Тамразян А. Г., Мешков В. Р., Геращенко В. С., Гришин А. С. Аппроксимация решения линейной задачи теплопроводности при одностороннем нагреве бетона в условиях стандартного температурного режима пожара. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):52–66. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-52-66> EDN: PPUZMN

Approximating the solution of a linear heat transfer problem for concrete subjected to one-sided heating under standard fire conditions

Ashot G. Tamrazyan¹, Vadim R. Meshkov², Vitaly S. Gerashchenko^{1, 3} ✉, Andrey S. Grishin³

¹ Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), 26 Yaroslavskoe Shosse St., Moscow, 129337, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation

³ JSC "Atomenergoproekt", 7 Bakuninskaya St., building 1, Moscow, 105005, Russian Federation

✉ geraschenko_vs@aep.ru



Abstract. To estimate the fire resistance limit of reinforced concrete structures, it is essential to understand the temperature distribution within the concrete cross-section under standard fire conditions. Existing approximate analytical methods rely on the classical solution of the heat transfer equation assuming a constant surface temperature. The authors developed a degree approximation of the standard fire temperature curve. This approximation enables an approximate analytical solution to the heat transfer problem with a varying surface temperature corresponding to standard fire conditions. The aim of this work was to derive a convenient formula for heat transfer engineering calculations applicable to concrete with arbitrary thermophysical properties. The derived formula accurately predicts the temperature at any point within the concrete at a given time. The authors' solution was compared with the high-precision numerical simulations (ANSYS, MATLAB) for various concrete types. Because the proposed approximation does not involve special functions, its implementation does not require any specialized software. The accuracy, simplicity, and versatility of this formula make it suitable for use in fire resistance engineering calculations to determine the time-dependent temperature distribution within concrete under standard fire conditions.

Keywords: standard fire conditions, standard fire temperature curve, fire resistance of reinforced concrete structures, temperature calculation

For citation: Tamrazyan A. G., Meshkov V. R., Gerashchenko V. S., Grishin A. S. Approximating the solution of a linear heat transfer problem for concrete subjected to one-sided heating under standard fire conditions. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):52–66. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-52-66>



1. Введение / Introduction

Для расчетной оценки предела огнестойкости железобетонных конструкций нужно знать, как распределяется температура по бетону в поперечном сечении элемента под воздействием стандартного температурного режима пожара согласно ГОСТ 30247.0-94¹ и СП 468.1325800.2019².

Температурные поля в твердых телах при значительном изменении температуры с течением времени описываются нелинейным трехмерным дифференциальным уравнением теплопроводности с нелинейными граничными условиями. Решение задачи теплопроводности в такой, полной, постановке возможно только с помощью численных методов. Однако для инженерных оценок можно рассматривать упрощенные модели тепловых процессов, допускающие построение аналитических решений. Такие модели рассматриваются как в отечественной литературе [1, 2], так и в зарубежных руководствах по расчету огнестойкости [3–5].

Наиболее существенное упрощение достигается путем перехода к двумерной или даже одномерной постановке задачи теплопроводности [6]. Так, для плоских железобетонных элементов (плит пе-

¹ ГОСТ 30247.0-94 (ИСО 834-75). Межгосударственный стандарт. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования = Elements of building constructions/ Fire-resistance test methods. General requirements. Введен 01.01.1996. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9055248> (дата обращения: 15.09.2024).

² СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности = Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring of fire resistance and fire safety. Введен 11.06.2020. URL: <https://docs.cntd.ru/document/564542941> (дата обращения: 15.09.2024).

рекрытий, стен) характерен односторонний и равномерный по площади поверхности нагрев, поэтому можно считать, что температура меняется только по толщине (одномерная задача теплопроводности). Для стержневых элементов характерными являются схемы равномерного нагрева с четырех сторон (колонны) или с трех сторон (балки, ригели). Следовательно, допустимо пренебречь изменением температуры по длине элемента и рассматривать двухмерное распределение температуры по сечению.

Еще одна возможность для упрощения связана с тем, что, с точки зрения оценки огнестойкости бетонных конструкций, наиболее важен момент, когда критических значений достигает температура элементов арматуры, ближайших к поверхности. Для крупных несущих элементов этот момент критического прогрева наступает задолго до того, как прогреются глубокие слои бетона. В случаях, когда существенный прогрев затрагивает только приповерхностные слои, твердое тело вполне можно рассматривать как полубесконечное.

Таким образом, одномерная модель полубесконечного тела является основой аналитического расчета бетонных конструкций на огнестойкость. Поэтому в данной работе мы анализируем именно эту тепловую модель.

В инженерной практике расчеты прогрева сечений железобетонных конструкций выполняют обычно либо с применением приближенно-аналитических методов (метод фиктивного термического слоя [2], метод решения через интеграл вероятностей [1]), либо путем численного моделирования (метод конечных разностей, метод элементарных тепловых балансов, метод конечных элементов [7, 8]), либо по стандартным графикам и номограммам (например, из СП 468.1325800.2019).

Численные методы уместно применять, когда необходимо провести точное моделирование теплового состояния конструкций сложной формы [9]. Номограммы не всегда удобны и не годятся для нестандартных материалов. Приближенно-аналитические методы, на наш взгляд, лучше всего подходят для универсального применения в оценочных расчетах. Имеющиеся в литературе приближенно-аналитические методики время от времени дорабатываются с учетом новых данных [10–12]. Предпринимаются также попытки дальнейшего их упрощения или уточнения [5, 13]. Эти изменения находят отражение и в новых редакциях стандартов типа EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2³. Таким образом, простые и универсальные приближенно-аналитические методики по-прежнему актуальны, широко применяются и дорабатываются. Однако в отечественной литературе новых работ по этой теме в последнее время появляется мало.

В данной работе предложен приближенный аналитический способ решения тепловой задачи огнестойкости. Мы построили аналитическое решение простейшей модельной задачи теплопроводности в условиях стандартного пожара, показали, что такое решение можно получить, если использовать степенную аппроксимацию стандартной температурной кривой. Далее мы предложили простую, но достаточно точную аппроксимацию полученного аналитического решения. В результате получили формулу, удобную для инженерных теплотехнических расчетов и применимую для бетонов с произвольными теплофизическими характеристиками.

Построение аналогичных формул для задачи в нелинейной постановке является целью дальнейшего исследования.

2. Материалы и методы / Materials and methods

2.1. Стандартный температурный режим пожара

³ EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1–2: General rules. Structural fire design, CEN, Brussels, 2004. URL: <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/cen/597bff7e-4f49-446f-ac9b-69829a09d098/en-1992-1-2-2004> (accessed 14.11.2024).

Для обеспечения сопоставимости результатов испытаний различных конструкций на огнестойкость, выполненных в различных лабораториях, международный стандарт ISO 834-1:1999⁴ и составленный на его основе ГОСТ 30247.0-94 предписывают проводить испытания при некотором условном температурном режиме, называемом стандартным. Стандартный температурный режим используется и в тепловых расчетах оценки огнестойкости.

Стандартным считается режим пожара, при котором температура продуктов сгорания меняется во времени по логарифмическому закону

$$T - T_0 = 345 \lg(1 + 0.133t) = \Phi_0(t), \quad (1)$$

где t – время, с; T_0 – начальная температура (обычно принимают $T_0 = 20$ °C).

Зависимость (1) обобщает результаты многочисленных экспериментов, проводившихся с начала прошлого века в лабораториях различных стран, и описывает в некотором смысле наихудший сценарий развития пожара в помещении, при котором температура быстро нарастает за короткое время, а затем медленно, но неуклонно увеличивается.

Американским стандартом ASTM E-119⁵ стандартный режим пожара вводится несколько иначе [5]:

$$T - T_0 = 750(1 - \exp(-0.0633\sqrt{t})) + 2.84\sqrt{t}.$$

В первые 30 мин пожара эта зависимость практически совпадает с (1), а затем дает немного более низкие значения температуры.

Заметим, что ГОСТ 30247.0-94 допускает отклонение температуры от стандартной кривой при огневых испытаниях. Допустимые отклонения указаны в таблице 1.

Таблица 1. Допустимые относительные отклонения от стандартной кривой
Table 1. Allowable relative deviations from the standard curve

t , мин	5–10 мин	10–45 мин	45–360 мин
Δ , %	± 15	± 10	± 5

Зависимость (1) проста и удобна для вычислений, однако наличие в ней логарифма не позволяет получить аналитическое решение даже линейной задачи теплопроводности. В объяснение причин этого можно указать, что для тепловых процессов логарифмические зависимости от времени не характерны.

Как показано ниже, аналитические решения линейной задачи теплопроводности можно получить, если температура пожара описывается степенными функциями. Поэтому нами была построена простая степенная аппроксимация зависимости (1). Коэффициенты аппроксимации определялись методом наименьших квадратов на неравномерной сетке со сгущением в направлении начала отсчета (рис. 1). В результате мы пришли к следующей формуле, где время t задается в секундах:

$$T - T_0 = 13\,770 t^{0.01} - 14\,022 = \tilde{\Phi}_0(t). \quad (2)$$

⁴ ISO 834-1:1999(E) International Standard. Fire-resistance tests – Elements of building construction. Part 1: General requirements. URL: https://russian.flammabilitytestingequipment.com/photo/flammabilitytestingequipment/document/10331/ISO834-1-1999Fire-resistancetests.Elementsofbuildingconstruction.Part1_Generalrequirements.pdf (accessed 11.11.2024).

⁵ ASTM E-119 Standard Test Methods for Fire Tests of Building Construction and Materials. URL: <https://archive.org/details/gov.law.astm.E0119.20/mode/2up> (accessed 14.11.2024).

На рис. 1 точками показаны значения, вычисленные по формуле (2). В диапазоне времени $t \in [1, 360]$ мин абсолютная погрешность аппроксимации (2) не превышает 5° .

Для очень короткого начального отрезка времени ($t < 6$ с) формула (2) дает отрицательные значения. Однако точные значения температуры при $t < 1$ мин не представляют практического интереса, а дальше аппроксимация (2) описывает стандартную температурную кривую с высокой точностью.

Перейдем к решению задачи теплопроводности в условиях стандартного температурного режима пожара.

2.2. Основная тепловая задача оценки огнестойкости

Основная цель теплового этапа расчетов на огнестойкость – определить температуру бетона и арматуры в сечении железобетонной конструкции при нагреве по стандартному температурному режиму и выяснить условия работы арматуры и бетона при нагреве. В частности, для каждого момента времени необходимо узнать толщину слоя бетона, нагретого выше критической температуры.

Бетон и стальная арматура, нагретые до температуры выше критической T_* , значительно теряют прочность. В результате этого внешний слой материала перестает участвовать в работе рассматриваемого сечения. Например, при расчете огнестойкости колонны ее рабочее сечение получается отбрасыванием поверхностного слоя, нагретого до температуры $T \geq T_*$, то есть ограничивается изотермой $T = T_*$. Для бетонных конструкций различного типа критическая температура принимается обычно в диапазоне $T_* \in [450, 600]^\circ\text{C}$.

Как было сказано выше, в большинстве случаев при расчете огнестойкости бетонные конструкции можно рассматривать в рамках модели полубесконечного тела. Уточним, что имеется в виду.

Глубина прогрева конструкции в условиях стандартного пожара зависит, безусловно, от ее геометрии. Ясно, например, что в один и тот же момент времени глубина прогрева колонны, нагреваемой пламенем со всех сторон, будет больше, чем глубина прогрева массивной плиты, нагреваемой с одной стороны. В то же время при уменьшении рабочего сечения колонны даже в три раза толщина слоя, нагретого выше критической температуры, остается относительно небольшой – порядка $1/6$ размера колонны (рис. 2).

На рис. 2 показаны зоны критического нагрева ($T_* \geq 500^\circ\text{C}$) для бетонной колонны размером 600 мм (а) и для полубесконечного тела (полупространства) из того же материала (b) в один и тот же момент времени. Как можно видеть, глубина прогрева колонны в средних точках сторон сечения незначительно превышает глубину прогрева полупространства в тот же момент времени. В моменты времени, предшествующие критической потере несущих свойств, отличие будет еще менее существенным.

Таким образом, можно утверждать, что приближенная оценка глубины прогрева конструкции любой формы может проводиться при помощи формул, полученных для одномерной задачи об одностороннем нагреве полупространства. Поэтому указанную одномерную задачу уместно назвать

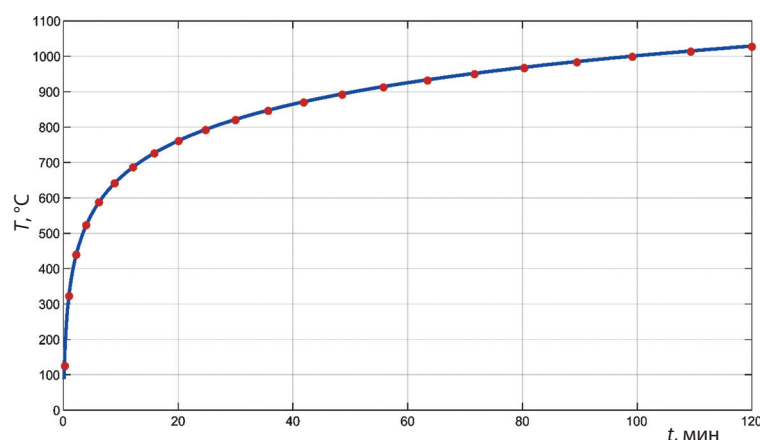


Рис. 1. Стандартная температурная кривая (сплошная линия) и ее аппроксимация (точки), предлагаемая авторами
Fig. 1. Standard temperature curve (solid line) and its approximation (points), proposed by the authors

основной тепловой задачей оценки огнестойкости.

Итак, рассмотрим задачу о нагреве полужограниченного тела (полупространства) в условиях стандартного пожара. Поскольку температура при пожаре меняется в широких пределах, приходится учитывать зависимость теплофизических параметров от температуры. На поверхности тела происходит сложный теплообмен с продуктами сгорания. При этом существенную роль может играть лучистая составляющая теплового потока. С учетом сказанного математическая постановка задачи записывается так:

$$\begin{aligned} \rho c(T) \frac{\partial T}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial x} \left(k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right), \quad x \in [0, \infty), \\ -k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} &= \alpha (T_0 + \Phi(t) - T|_{x=0}) + \varepsilon \sigma_0 \left((T_0 + \Phi(t))^4 - T^4 \Big|_{x=0} \right), \\ T|_{t=0} &= T_0, \quad T \xrightarrow{x \rightarrow \infty} T_0, \end{aligned} \quad (3)$$

где ρ , $c(T)$, $k(T)$ – теплофизические параметры материала (плотность, удельная теплоемкость и коэффициент теплопроводности);

$\Phi(t)$ – закон изменения относительной температуры продуктов сгорания, например, $\Phi(t) = \Phi_0(t)$ для стандартной температурной кривой (1);

α – коэффициент конвективного теплообмена;

ε – приведенная степень черноты;

$\sigma_0 = 5.67 \cdot 10^{-8}$ – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м²/К⁴.

Температура в задаче (3) измеряется в кельвинах. Зависимости $c(T)$ и $k(T)$ для бетонов различных типов принимаются, как правило, линейными согласно СП 468.1325800.2019:

$$c = c_0 + c_1 T, \quad k = k_0 + k_1 T. \quad (4)$$

Наконец, [2, 3] рекомендуют принимать параметры теплообмена в диапазонах: $\alpha \in [20, 35]$ Вт/м²К, $\varepsilon \in [0.7, 0.95]$.

Зависимость коэффициентов c , k от неизвестной функции $T(x, t)$, а также наличие в граничном условии слагаемого T^4 делает задачу (3) нелинейной. Получить аналитическое решение этой задачи даже при $\Phi_0(t) = \text{const}$ не удастся.

Имеются два пути упрощения задачи (3).

Первый путь состоит в линеаризации граничного условия с заменой его на граничное условие третьего рода

$$-k(T) \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = \tilde{\alpha} (T_0 + \Phi(t) - T|_{x=0}), \quad (5)$$

где $\tilde{\alpha}$ – приведенный коэффициент теплообмена, учитывающий как конвективную, так и лучистую составляющие.

Более радикальным вариантом является замена условия теплообмена (3) на граничное условие первого рода

$$T|_{x=0} = T_0 + \Phi(t). \quad (6)$$

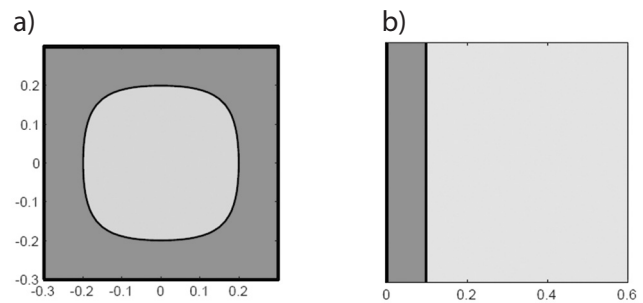


Рис. 2. Зоны перегрева: а) в сечении колонны; б) в полупространстве (расчет выполнен авторами)
Fig. 2. Overheating zones: a) in the column cross-section; b) in the half-space (calculation by the authors)

Это означает, что температура поверхности принимается равной температуре продуктов сгорания.

В работе [14] было проведено сравнение температуры поверхности $T|_{x=0}$, получающейся при решении задачи (3) численным методом, и температуры продуктов сгорания при стандартном пожаре. Показано, что существенное отличие наблюдается только на начальном отрезке времени $t < 10$ мин. При $t > 10$ мин относительная погрешность монотонно уменьшается и не превосходит 20 % для нормальных бетонов и 10 % для легких.

Важно отметить, что, используя условие (6) вместо условия теплообмена (3), мы будем всегда получать завышенные значения местной температуры и толщины слоя прогрева. Это автоматически дает некоторый запас огнестойкости при проектировании. В то же время такая упрощенная модель будет в целом правильно отражать динамику распространения тепла при стандартном пожаре.

Таким образом, замена граничного условия (3) условием первого рода (6) – вполне оправданное упрощение при первоначальной оценке огнестойкости бетонных конструкций.

Второй путь упрощения задачи (3) состоит в линеаризации самого уравнения теплопроводности. При этом считают, что теплофизические параметры принимают постоянные значения $c_* = c(T_*)$, $k_* = k(T_*)$, соответствующие некоторой выбранной температуре T_* – температуре линеаризации. Можно, например, взять T_* равной критической температуре бетона. Так, при $T_* = 500$ °С по формулам вида (4) получаем следующие значения:

$$c_* = 1\,125 \text{ Дж / кг} \cdot \text{К}, \quad k_* = 1.025 \text{ Вт / м} \cdot \text{К}, \quad a_* = \frac{k_*}{\rho c_*} = 3.88 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2 / \text{с}.$$

Здесь a_* – температуропроводность материала при температуре линеаризации T_* .

Используя оба описанных упрощения, получаем линейную задачу теплопроводности с граничным условием первого рода:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a_* \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, \quad x \in [0, \infty); \quad T|_{x=0} = T_0 + \Phi(t), \quad T|_{t=0} = T_0, \quad T \xrightarrow{x \rightarrow \infty} T_0. \quad (7)$$

Эту задачу будем называть *простейшей модельной задачей оценки огнестойкости*.

2.3. Аналитические решения простейшей модельной задачи

Простые аналитические решения лежат в основе инженерных методов расчета. Такие формулы легко анализировать, выявляя важные закономерности явления, по ним легко считать, легко строить аппроксимации. Так, например, в задачах оценки огнестойкости широко применяется аналитическое решение линейной задачи с постоянной температурой поверхности⁶ $T|_{x=0} = T_1 = \text{const}$ [15, 16]:

$$T(x, t) - T_0 = (T_1 - T_0) \operatorname{erfc}(\xi), \quad (8)$$

где $\operatorname{erfc}(\xi)$ – дополнительная функция ошибок.

Отдельно отметим обозначение

$$\xi = \frac{x}{2\sqrt{a_* t}}. \quad (9)$$

Безразмерный параметр ξ играет важную роль в аналитических решениях задачи (7).

Несмотря на то, что во всех моделях огневого воздействия температура продуктов сгорания $\Phi(t)$, а следовательно и температура поверхности меняется существенным образом, простая форму-

⁶ Зайцев В. Ф., Полянин А. Д. *Справочник по дифференциальным уравнениям с частными производными: точные решения*. Москва: МПО; 1996. 496 с.

ла (8) тем или иным способом адаптируется для применения в этой, более общей ситуации. Одним из наиболее известных приложений формулы (8) является метод фиктивного термического слоя [4].

Построить аналитическое решение задачи (7) для произвольной температурной кривой $\Phi(t)$ можно в интегральной форме⁷:

$$T(x, t) = \frac{x}{2a_*\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp\left(-\frac{x^2}{4a_*^2(t-s)}\right) \frac{\Phi(s)}{(t-s)^{3/2}} ds. \quad (10)$$

Но выразить этот интеграл в известных функциях удастся только для зависимостей Φ очень простого вида, а использовать его для простых оценочных расчетов неудобно.

Подчеркнем, что для стандартной логарифмической зависимости Φ_0 (формула (1)) явного аналитического решения задачи (7) не существует.

Наиболее простые аналитические формулы получаются, когда решение задачи (7) оказывается пропорциональным температуре $\Phi(t)$ продуктов сгорания, то есть имеет вид

$$T(x, t) - T_0 = \Phi(t)\Theta(x, t).$$

Выясним, для какого вида зависимостей $\Phi(t)$ существуют подобные решения.

В частном случае $\Theta = \Theta(x)$ мы приходим к классическому разделению переменных. Подставляя $T(x, t) - T_0 = \Phi(t)\Theta(x)$ в уравнение и граничное условие задачи (7), получаем:

$$\Theta(x)\Phi'(t) = a_* \Phi(t)\Theta''(x), \quad \Phi(t)\Theta(0) = \Phi(t),$$

откуда следует:

$$\frac{\Phi'(t)}{\Phi(t)} = a_* \frac{\Theta''(x)}{\Theta(x)} = \lambda, \quad \Theta(0) = 1,$$

где λ – так называемая постоянная разделения. Решая полученные независимые дифференциальные уравнения для Φ и Θ , приходим к частному решению вида:

$$T(x, t) = C \exp \lambda t \exp\left(-\sqrt{\frac{\lambda}{a_*}} x\right).$$

Следовательно, классический метод разделения переменных дает явное аналитическое решение только для зависимостей Φ в виде возрастающей экспоненты $\Phi(t) = C \exp \lambda t, \lambda > 0$. Отметим, что стандартные температурные кривые не используют такие зависимости.

Более широкий класс частных решений можно получить, если рассматривать зависимости Θ более общего вида (обобщенное разделение переменных) [16]:

$$\Theta(x, t) = \Theta(\xi), \quad \xi = cxt^\beta, \quad c = \text{const}.$$

В этом случае при подстановке в (7) получаем:

$$\frac{\Phi'}{t^{2\beta}\Phi} = a_* c^2 \frac{\Theta''}{\Theta} - c\beta x t^{-\beta-1} \frac{\Theta'}{\Theta}.$$

Разделить переменные в этом уравнении возможно, только если произведение $x t^{-\beta-1}$ выражается через параметр $\xi = cxt^\beta$, то есть только в случае $-\beta - 1 = \beta$ или при $\beta = -1/2$.

Из предыдущего уравнения при $\beta = -1/2$ и $c = 1 / 2\sqrt{a_*}$ следует:

⁷ Там же.

$$\frac{t \varphi'(t)}{\varphi(t)} = \frac{1}{4} \frac{\Theta''(\xi)}{\Theta(\xi)} + \frac{\xi}{2} \frac{\Theta'(\xi)}{\Theta(\xi)} = \lambda, \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{a_* t}},$$

где λ – постоянная разделения, а переменная ξ – в точности безразмерный параметр, введенный формулой (9).

Для зависимости Φ получаем дифференциальное уравнение:

$$\frac{\Phi'}{\Phi} = \frac{\lambda}{t},$$

откуда находим $\Phi(t) = Ct^\lambda$.

Таким образом, лишь для степенных зависимостей $\Phi(t) = Ct^\lambda$ существуют решения задачи (7) простого вида:

$$T(x, t) - T_0 = \Phi(t) \Theta(\xi) = t^\lambda \Theta(\xi) = Ct^\lambda \Theta\left(\frac{x}{2\sqrt{a_* t}}\right).$$

Следовательно, для получения простых аналитических решений разумно применять именно степенные аппроксимации температурных кривых.

Для функции $\Theta(\xi)$ при разделении переменных получается линейное дифференциальное уравнение

$$\Theta'' + 2\xi\Theta' - 4\lambda\Theta = 0.$$

Его решение выражается через вырожденную гипергеометрическую функцию ${}_1F_1(p, q; z)$ (см. уравнение 2.6.3.67 в справочнике⁸) и имеет вид:

$$\Theta_\lambda(\xi) = {}_1F_1\left(-\lambda; \frac{1}{2}, -\xi^2\right) - \frac{2\Gamma(\lambda+1)\xi}{\Gamma\left(\lambda+\frac{1}{2}\right)} {}_1F_1\left(\frac{1}{2} - \lambda; \frac{3}{2}, -\xi^2\right), \quad (11)$$

где $\Gamma(z)$ – гамма-функция. Мы ввели обозначение $\Theta_\lambda(\xi)$, чтобы подчеркнуть зависимость функции Θ от показателя степени λ .

Итак, мы убедились, что для степенной температурной кривой $\Phi(t) = Ct^\lambda$ простейшая модельная задача (7) имеет явное решение

$$T(x, t) - T_0 = Ct^\lambda \Theta_\lambda(\xi), \quad \xi = \frac{x}{2\sqrt{a_* t}}. \quad (11.1)$$

Важно заметить, что поскольку задача (7) линейная, мы можем написать явное решение и для случая, когда $\Phi(t)$ является конечной комбинацией степенных функций:

$$\Phi(t) = \sum_{n=1}^N C_n t^{\lambda_n}.$$

В таком случае мы имеем просто

$$T(x, t) - T_0 = \sum_{n=1}^N C_n t^{\lambda_n} \Theta_{\lambda_n}(\xi).$$

В заключение укажем, что для граничного условия третьего рода получить аналогичным способом явные решения не удастся. В справочнике⁹ приводится точное решение задачи с условием

⁸ Зайцев В. Ф., Полянин А. Д. Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям. Москва: Физматлит; 2001. 576 с.

⁹ Зайцев В. Ф., Полянин А. Д. Справочник по дифференциальным уравнениям с частными производными: точные решения. Москва: МПО; 1996. 496 с.

третьего рода (5) в виде двойного интеграла. Но использовать его для практических расчетов не представляется возможным. В фундаментальной монографии [16] можно найти явное решение для случая $\Phi(t) = T_1 = \text{const}$.

2.4. Аппроксимация решения задачи для степенных температурных кривых

Как было показано выше, явные аналитические решения простейшей модельной задачи (7) можно построить только для температурных кривых экспоненциального вида $\Phi(t) = C \exp \lambda t$ ($\lambda > 0$) и степенного вида $\Phi(t) = Ct^\lambda$. Растущие экспоненциальные зависимости не подходят для представления стандартных температурных кривых. Поэтому сосредоточимся на изучении решения (11.1) для степенной зависимости $\Phi(t)$.

Формула (11) сложна для проведения инженерных расчетов, однако она допускает аппроксимацию простого вида.

Построить такую аппроксимацию удастся благодаря структуре решения. А именно, вместо функции двух переменных $T(x, t)$ общего вида мы имеем здесь произведение $\Phi(t)\Theta(\xi)$ двух функций, зависящих каждая от своего аргумента. При этом аппроксимировать нужно только функцию одной переменной $\Theta(\xi)$.

Можно показать, что формула (11) годится для $\lambda > -1$, однако при отрицательных значениях λ функция t^λ обращается в бесконечность при $t = 0$. Поэтому будем рассматривать «физический» диапазон значений $\lambda \geq 0$.

Для конкретных значений λ функция $\Theta_\lambda(\xi)$ может быть выражена через известные специальные функции. Так, например, при $\lambda = 0, 1/4, 1/2, 1$ имеем соответственно

$$\begin{aligned}\Theta_0(\xi) &= \operatorname{erfc}(\xi), \\ \Theta_{\frac{1}{4}}(\xi) &= \frac{2\Gamma\left(\frac{5}{4}\right)}{\pi} \exp(-\xi^2/2) \xi^{3/2} \left(K_{\frac{3}{4}}(\xi^2/2) - K_{\frac{1}{4}}(\xi^2/2) \right), \\ \Theta_{\frac{1}{2}}(\xi) &= \exp(-\xi^2) - \sqrt{\pi} \xi \operatorname{erfc}(\xi), \\ \Theta_1(\xi) &= (2\xi^2 + 1) \operatorname{erfc}(\xi) - \frac{2\xi}{\sqrt{\pi}} \exp(-\xi^2).\end{aligned}$$

Заметим, что вообще при $\lambda = n, n + 1/2, n \in \mathbb{N}$, функция Θ_λ выражается через дополнительную функцию ошибок erfcz , а при $\lambda = n + 1/4, n + 3/4$ – через функции Макдональда $K_p(z)$ (модифицированная функция Бесселя второго рода) порядка p .

При $\lambda = 0$ мы имеем $t^\lambda \equiv 1$. Поэтому функция $\Theta_0(\xi)$ дает классическое решение (8) для постоянной температуры T_1 на границе:

$$T(x, t) - T_0 = (T_1 - T_0) \Theta_0(\xi) = (T_1 - T_0) \operatorname{erfc}(\xi).$$

Несмотря на существенно различные формулы, функции Θ_λ при различных значениях λ имеют схожие свойства: это убывающие функции экспоненциального типа (рис. 3). Кроме того, $\Theta_\lambda(0) = 1$ для всех $\lambda \geq 0$.

Представляется разумным аппроксимацию функции $\Theta_\lambda(\xi)$ искать в виде:

$$\Theta_\lambda(\xi) \approx \exp(-\alpha_1 \xi - \alpha_2 \xi^2), \quad (12)$$

где коэффициенты α_1 и α_2 зависят от значения λ .

Методом наименьших квадратов были найдены оптимальные коэффициенты α_1 и α_2 экспоненциальной аппроксимации (12). Результаты представлены в таблице 2 и на графиках рис. 3. В таблице 2

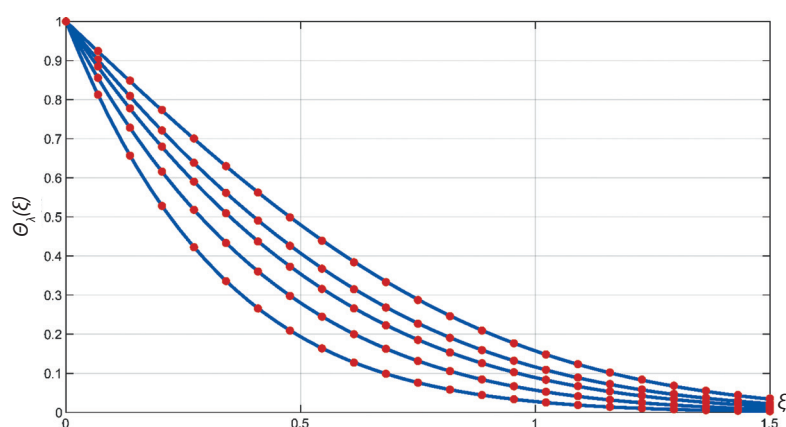


Рис. 3. Функции $\Theta_\lambda(\xi)$ при $\lambda = 0, 1/4, 1/2, 1, 2$ (сверху вниз) и их аппроксимации (точки) (вычисления выполнены авторами)

Fig. 3. Functions $\Theta_\lambda(\xi)$ at $\lambda = 0, 1/4, 1/2, 1, 2$ (top to bottom) and their approximations (points) (calculations by the authors)

указаны также значения Δ_{max} максимальной абсолютной погрешности аппроксимации.

Как можно видеть, формула (12) обеспечивает отличную точность по меркам инженерных расчетов.

Итак, приближенное решение простейшей модельной задачи со степенным граничным условием $T|_{x=0} - T_0 = Ct^\lambda$ имеет вид

$$T(x, t) - T_0 = Ct^\lambda \exp(-\alpha_1 \xi - \alpha_2 \xi^2).$$

Таблица 2. Коэффициенты аппроксимации функции $\Theta_\lambda(\xi)$
Table 2. Coefficients for approximating the function $\Theta_\lambda(\xi)$

λ	α_1	α_2	Δ_{max}
0.00	1.1003	0.7493	$1.7 \cdot 10^{-3}$
0.01	1.1163	0.7466	$1.6 \cdot 10^{-3}$
0.25	1.4550	0.6970	$1.3 \cdot 10^{-3}$
0.50	1.7519	0.6622	$1.0 \cdot 10^{-3}$
1.00	2.2418	0.6192	$0.7 \cdot 10^{-3}$
2.00	3.0003	0.5768	$0.3 \cdot 10^{-3}$

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Аппроксимация решения задачи для стандартной температурной кривой

В подразделе 2.1 мы построили степенную аппроксимацию (2) стандартной температурной кривой $\Phi_0(t)$

$$\tilde{\Phi}_0(t) = 13\,770t^{0.01} - 14\,022.$$

Результаты подраздела 2.3 позволяют сразу написать решение задачи (7) для такой температурной кривой:

$$T(x, t) - T_0 = 13\,770t^{0.01}\Theta_{0.01}(\xi) - 14\,022\Theta_0(\xi).$$

Используя данные таблицы 2, получаем приближенное решение простейшей модельной задачи для условий стандартного пожара:

$$T(x, t) - T_0 \approx 13\,770t^{0.01} \exp(-1.1163\xi - 0.7466\xi^2) - 14\,022 \exp(-1.1003\xi - 0.7493\xi^2). \quad (13)$$

Сравним результаты расчетов по приближенной формуле (13) с результатами высокоточного численного моделирования. Такое сравнение служит одновременной проверкой как точности экспоненциальной аппроксимации (12), так и правильности аналитического решения (11). Численный метод с контролем точности для решения линейной задачи (7), а также исходной нелинейной задачи (3) был реализован в системе MATLAB с использованием стандартного решателя ode15s для систем обыкновенных дифференциальных уравнений.

Результаты показаны на рис. 4, где сплошные линии представляют численное (высокоточное) решение при $\Phi(t) = \Phi_0(t)$, а точки – значения, полученные по приближенной формуле (13); графики показывают распределение температуры по глубине в моменты времени $t = 5, 10, 30, 60, 120, 240$ и

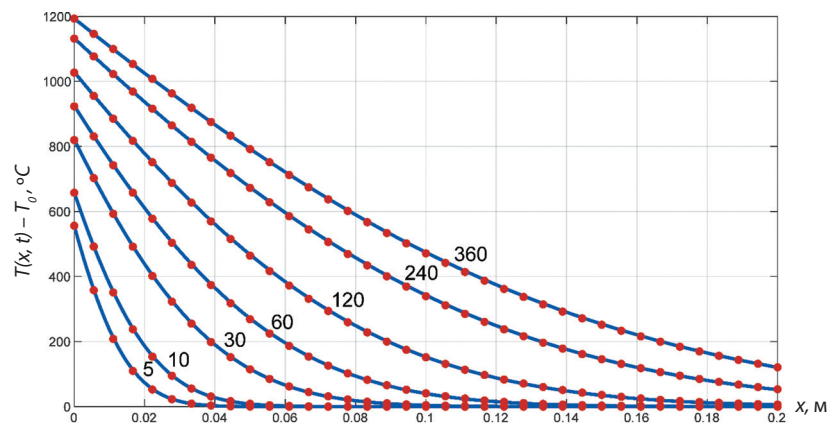


Рис. 4. Сравнение формулы (13) (точки) и высокоточного численного расчета (сплошные кривые) (вычисления выполнены авторами)

Fig. 4. Comparison of formula (13) (points) and high-precision numerical calculation (solid curves) (calculations by the authors)

360 мин. Максимальная абсолютная погрешность аппроксимации для всех представленных кривых составляет 3.5°.

Построенную аппроксимацию (13) можно еще упростить. Заметим, что в аппроксимацию $\tilde{\Phi}_0(t)$ входит степень $\lambda = 0.01 \ll 1$ переменной t . При этом зависимость $\Theta_\lambda(\xi)$ от параметра λ непрерывна, поэтому функции $\Theta_{0.01}(\xi)$ и $\Theta_0(\xi)$ достаточно близки, то есть:

$$At^{0.01}\Theta_{0.01}(\xi) - B\Theta_0(\xi) \approx (At^{0.01} - B)\Theta_\lambda(\xi),$$

где A, B – коэффициенты аппроксимации (2); $\lambda \in [0, 0.01]$ – некоторое среднее значение.

Можно предположить, что, хотя функция $\Phi_0(t)$ и не является степенной, аппроксимацию решения простейшей задачи при $\Phi(t) = \Phi_0(t)$ также можно искать в виде

$$T(x, t) - T_0 = \Phi_0(t) \exp(-\alpha_1 \xi - \alpha_2 \xi^2).$$

Для построения такой аппроксимации приходится рассматривать функцию точного решения $T(x, t)$ уже как функцию двух переменных для диапазонов $t \in [t_{\min}, t_{\max}]$ и $x \in [0, x_{\max}]$ изменения независимых переменных. Коэффициенты аппроксимации α_1, α_2 подбираются исходя из условия минимизации невязки с точным решением во всем диапазоне изменения переменных. В расчетах мы принимали $[t_{\min}, t_{\max}] = [5, 200]$ мин, $x_{\max} = 0.2$ м. Методом наименьших квадратов были найдены оптимальные значения $\alpha_1 = 1.3290, \alpha_2 = 0.7352$.

Максимальная абсолютная погрешность аппроксимации в указанном диапазоне составила 19.3°.

Итак, еще одна простая аппроксимация решения задачи (7) для условий стандартного пожара имеет вид

$$T(x, t) - T_0 \approx 345 \lg(1 + 0.133t) \exp(-1.329\xi - 0.7352\xi^2). \quad (14)$$

Точность аппроксимации ожидаемо оказалась более низкой по сравнению с аппроксимацией (13), но, как показывает рис. 5, соответствие результатов все же достаточно хорошее. При этом формула (14) несколько проще и обладает следующим важным преимуществом. Соотношение (14) при заданном значении температуры легко разрешить как относительно t , так и относительно $\xi(x)$. Это дает возможность легко вычислять глубину прогрева до критической температуры T_* в заданный момент времени или же находить время прогрева до T_* на заданной глубине.

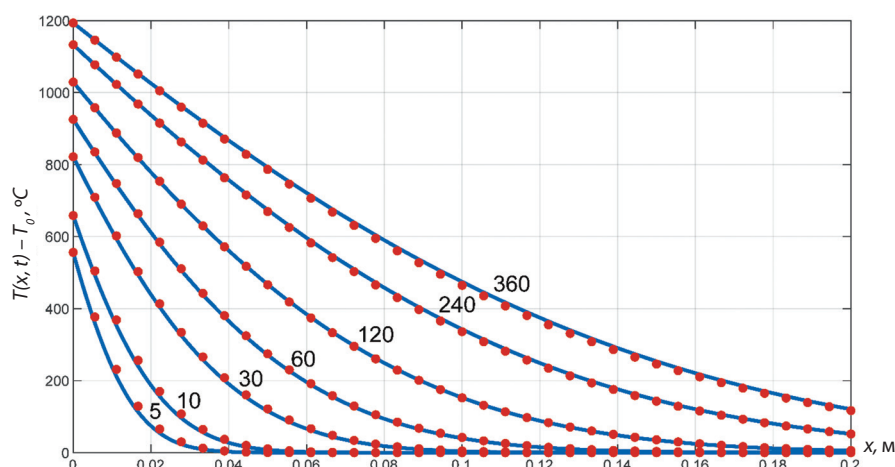


Рис. 5. Точность аппроксимации по формуле (14) (расчеты выполнены авторами)
Fig. 5. Accuracy of the approximation based on the formula (14) (calculations by the authors)

4. Заключение / Conclusions

Построенная экспоненциальная аппроксимация (13)–(14) дает решение линеаризованной тепловой задачи (7) оценки огнестойкости с достаточной для инженерных оценок точностью во всем диапазоне изменения температуры в ходе стандартного пожара.

Методика получения формулы (14) основана на использовании степенной аппроксимации температурной кривой и, следовательно, может быть использована для температурных кривых, отличных от стандартной кривой (1). При этом следует использовать общую формулу (11) с последующим построением аппроксимаций вида (13)–(14).

Формула (14) универсальна, поскольку годится для бетонов с любыми теплофизическими свойствами. При этом она не содержит специальных функций, что, безусловно, упрощает оценочные расчеты.

Аппроксимации (13)–(14) построены для простейшей модельной задачи стандартного пожара, которая представляет собой линеаризованную версию основной задачи (3) оценки огнестойкости. В дальнейшем планируется провести систематическое исследование основной задачи (3) в нелинейной постановке с целью построения уточненного варианта аппроксимации (13)–(14).



Вклад авторов. Тамразян А. Г. – научное сопровождение. Мешков В. Р. – написание статьи. Геращенко В. С. – сбор и анализ материалов. Гришин А. С. – научное редактирование статьи.

Author contributions. Ashot G. Tamrazyan: provided scientific supervision. Vadim R. Meshkov: wrote the article. Vitaly S. Gerashchenko: collected and analysed data. Andrey S. Grishin: performed scientific editing of the article.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список литературы

1. Яковлев А. И. *Расчет огнестойкости строительных конструкций*. Москва: Стройиздат; 1988. 143 с. URL: <https://dwg.ru/lib/3452>.
2. Федоров В. С., Левитский В. Е., Молчадский И. С., Александров А. В. *Огнестойкость и пожарная опасность строительных конструкций*. Москва: АСБ; 2009. 408 с.
3. LaMalva K., Hopkin D. (eds). *International handbook of structural fire engineering*. Switzerland: Springer; 2021. 529 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77123-2>
4. Buchanan A. H., Abu A. K. *Structural design for fire safety*. 2nd edition. UK: Wiley; 2017. 436 p.

5. Wickström U. *Temperature calculation in fire safety engineering*. Switzerland: Springer; 2016. 256 p. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-30172-3>.
6. Hertz K. *Design of fire-resistant concrete structures*. London: ICE; 2019. 256 p. <http://dx.doi.org/10.1680/dofrcs.64447>
7. Мостовских Д. С., Беляева З. В. Расчет огнестойкости нестандартных сечений элементов железобетонных конструкций с использованием ПК ANSYS. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2022;8(1):5–19. <http://dx.doi.org/10.15826/rjcst.2022.1.001>
8. Ширко А. В., Камлюк А. Н., Полевое И. И., Зайнудинова Н. В. Теплотехнический расчет огнестойкости элементов железобетонных конструкций с использованием ANSYS. *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. 2013;18(2):260–269. URL: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/pdf/ICE/v18/n2/260.pdf>.
9. Камлюк А. Н., Полевое И. И., Ширко А. В. Модели материалов арматуры и бетона для теплотехнических и прочностных расчетов на примере Российского стандарта. *Вестник Командно-инженерного института МЧС Республики Беларусь*. 2013;17(1):104–116. URL: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/pdf/ICE/v17/n1/104.pdf>.
10. Tamrazyan A. G., Avetisyan L. A. Behavior of compressed reinforced concrete columns under thermodynamic influences taking into account increased concrete deformability. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 21, Construction – The Formation of Living Environment. 2018;365:052034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/5/052034>
11. Tamrazyan A. G., Avetisyan L. A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures. In: *XXV Polish – Russian – Slovak Seminar "Theoretical Foundation of Civil Engineering". Series "Procedia Engineering"*. 2016;153:721–725. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.232>
12. Тамразян А. Г. Расчет внецентренно сжатых железобетонных элементов при динамическом нагружении в условиях огневых воздействий. *Промышленное и гражданское строительство*. 2015;(3):29–35. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23217619>.
13. Kodur V. K. R., Baolin Yu., Dwaikat M. M. S. A simplified approach for predicting temperature in reinforced concrete members exposed to standard fire. *Fire Safety Journal*. 2013;56:39–51. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.12.004>
14. Wickström U. Application of the standard fire curve for expressing natural fires for design purposes. In: *Fire safety: Science and engineering*. ASTM International; 1985. P. 145–159. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:961622/FULLTEXT01.pdf>. <https://doi.org/10.1520/STP352955>
15. Карташов Э. М. *Аналитические методы в теории теплопроводности твердых тел*. 3-е изд., перераб. и доп. Москва: Высшая школа; 2001. 550 с. URL: <https://djvu.online/file/itro9ZmA4f0HX?ysclid=m70495kzc6791923455>.
16. Карслоу Г., Егер Д. *Теплопроводность твердых тел*. Москва: Наука, 1964. 487 с.

References

1. Yakovlev A. I. *Calculation of fire resistance for building structures*. Moscow: Stroyizdat; 1988. (In Russ.) URL: <https://dwg.ru/lib/3452>.
2. Fedorov V. S., Levitskiy V. Ye., Molchadskiy I. S., Aleksandrov A. V. *Fire resistance and fire hazard of building structures*. Moscow: ASV; 2009. (In Russ.)
3. LaMalva K., Hopkin D. (eds). *International handbook of structural fire engineering*. Switzerland: Springer; 2021. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-77123-2>
4. Buchanan A. H., Abu A. K. *Structural design for fire safety*. 2nd edition. UK: Wiley, 2017.
5. Wickström U. *Temperature calculation in fire safety engineering*. Switzerland: Springer; 2016. URL: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-30172-3>.
6. Hertz K. *Design of fire-resistant concrete structures*. London: ICE; 2019. 256 p. <http://dx.doi.org/10.1680/dofrcs.64447>
7. Mostovskikh D. S., Belyaeva Z. V. Calculating fire resistance of non-standard cross-sections of elements of reinforced concrete structures using the ANSYS software complex. *Russian Journal of Construction Science and Technology*. 2022;8(1):5–19. <http://dx.doi.org/10.15826/rjcst.2022.1.001>
8. Shirko A. V., Kamlyuk A. N., Polevoda I. I., Zaynudinova N. V. Thermal engineering calculation of fire resistance of reinforced concrete structural elements using ANSYS. *Journal of Civil Protection*. 2013;18(2):260–269. (In Russ.) URL: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/pdf/ICE/v18/n2/260.pdf>.
9. Kamlyuk A. N., Polevoda I. I., Shirko A. V. Reinforcement and Concrete Material Models for Thermal and Structural Analyses Based on the Russian Standard. *Journal of Civil Protection*. 2013;17(1):104–116. (In Russ.) URL: <https://vestnik.ucp.by/arhiv/pdf/ICE/v17/n1/104.pdf>.
10. Tamrazyan A. G., Avetisyan L. A. Behavior of compressed reinforced concrete columns under thermodynamic influences taking into account increased concrete deformability. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 21, Construction – The Formation of Living Environment. 2018;365:052034. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/365/5/052034>

11. Tamrazyan A. G., Avetisyan L.A. Experimental and theoretical study of reinforced concrete elements under different characteristics of loading at high temperatures. In: *XXV Polish – Russian – Slovak Seminar "Theoretical Foundation of Civil Engineering". Series "Procedia Engineering"*. 2016;153:721–725. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.232>
12. Tamrazyan A. G. Calculation of eccentrically compressed reinforced concrete elements under dynamic loading in conditions of fire effect. *Industrial and civil engineering*. 2015;(3):29–35. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23217619>.
13. Kodur V. K. R., Baolin Yu., Dwaikat M. M. S. A simplified approach for predicting temperature in reinforced concrete members exposed to standard fire. *Fire Safety Journal*. 2013;56:39–51. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2012.12.004>
14. Wickström U. Application of the standard fire curve for expressing natural fires for design purposes. In: *Fire safety: Science and engineering*. ASTM International; 1985. P. 145–159. URL: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:961622/FULLTEXT01.pdf>. <https://doi.org/10.1520/STP352955>
15. Kartashov E. M. *Analytical methods in the theory of heat conduction in solids*. 3rd edition, revised. Moscow: Vysshaya shkola, 2001. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/itro9ZmA4f0HX?ysclid=m70495kzc6791923455>.
16. Carslaw H. S., Jaeger J. C. *Conduction of heat solids*. 2nd edition. Oxford University Press; 1959. 517 p. URL: <https://z-lib.org/book/562688/6cd858/conduction-of-heat-in-solids.html?dsouce=recommend>.



Информация об авторах

Тамразян Ашот Георгиевич, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация, tamrazian@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0569-4788>

Мешков Вадим Ростиславович, канд. техн. наук, доцент высшей школы теоретической механики и математической физики, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, meshkovadim@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2088-3932>

Геращенко Виталий Сергеевич, аспирант кафедры железобетонных и каменных конструкций, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация; главный технический эксперт, АО «Атомэнергопроект», Москва, Российская Федерация, geraschenko_vs@aep.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2701-2167>

Гришин Андрей Сергеевич, канд. техн. наук, начальник научно-исследовательского отдела динамики и сейсмостойкости, АО «Атомэнергопроект», Москва, Российская Федерация, grishin_as@aep.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3616-0200>

Information about the authors

Ashot G. Tamrazyan, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Head of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation, tamrazian@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0569-4788>

Vadim R. Meshkov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at the Higher School of Theoretical Mechanics and Mathematical Physics, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, meshkovadim@yandex.ru, <https://orcid.org/0009-0009-2088-3932>

Vitaly S. Gerashchenko, Postgraduate in the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation; Chief Technical Expert, JSC "Atomenergoproekt", Moscow, Russian Federation, geraschenko_vs@aep.ru, <https://orcid.org/0009-0003-2701-2167>

Andrey S. Grishin, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Research Department of Dynamics and Seismic Resistance, JSC "Atomenergoproekt", Moscow, Russian Federation, grishin_as@aep.ru, <https://orcid.org/0009-0006-3616-0200>

Получена 06 ноября 2024 г., одобрена 09 января 2025 г., принята к публикации 20 февраля 2025 г.
Received 06 November 2024, Approved 09 January 2025, Accepted for publication 20 February 2025



Реагентная очистка бытовых сточных вод от ионов аммония в условиях арктической децентрализации поселений

А. М. Фугаева ✉, Е. И. Вялкова

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

✉ nastyafugaeva@mail.ru

Аннотация. Децентрализованные арктические поселки повсеместно оборудуются современными системами водоснабжения, но при этом все чаще сталкиваются с проблемой сбора и очистки бытовых сточных вод. В исследовании рассматривались методы физико-химической обработки бытовых сточных вод, схожих по составу со стоками малых северных населенных пунктов, с целью замены этапа биологической очистки, малоэффективной в отношении органических веществ. В лабораторных условиях была проведена очистка образцов сточных вод нормальной (18–22 °C) и экстремальной (3–6 °C) температур по разным технологическим схемам. В результате авторами предложена наиболее эффективная технологическая схема очистки бытовых сточных вод удаленных арктических поселений, которая предусматривает следующие этапы: преаэрацию, отстаивание взвеси с коагуляцией и флокуляцией, химическое окисление и осаждение струвита, механическое и сорбционное фильтрование. Выяснилось, что данная технология мало зависит от температуры воды и пригодна для бытовых сточных вод с температурой от 3 до 22 °C. Использование данной схемы позволило на 96.5 % снизить концентрацию ионов аммония, на 98 % – взвешенных веществ, на 91 % – ХПК. Предложенная схема очистки бытовых сточных вод позволит упростить эксплуатацию станций в сложных арктических условиях, а также сделает возможной их работу в автоматическом режиме.

Ключевые слова: арктические поселения, бытовые сточные воды, ионы аммония, станция физико-химической очистки

Для цитирования: Фугаева А. М., Вялкова Е. И. Реагентная очистка бытовых сточных вод от ионов аммония в условиях арктической децентрализации поселений. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):67–80. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-67-80> EDN: QMMCR

Reagent-based treatment of domestic wastewater for ammonium removal in decentralized Arctic settlements

Anastasiia M. Fugaeva ✉, Elena I. Vialkova

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

✉ nastyafugaeva@mail.ru

Abstract. Decentralized Arctic settlements are equipped with modern water supply systems, yet they increasingly face the challenge of collecting and treating domestic wastewater. The study examined physical and chemical methods for treating domestic wastewater, similar in composition to wastewater from small northern settlements, with the goal of replacing the often inefficient biological treatment step, especially for organic substances. Wastewater samples at normal (18–22 °C) and extreme (3–6 °C) temperatures were

treated in the laboratory using various technological schemes. As a result, the authors propose the most effective technological scheme for treating domestic wastewater in remote Arctic settlements, which includes the following stages: pre-aeration, sedimentation with coagulation and flocculation, chemical oxidation and struvite precipitation, and mechanical and sorption filtration. It was found that this technology is largely independent of water temperature and suitable for domestic wastewater with temperatures ranging from 3 to 22 °C. The implementation of this scheme reduced the concentration of ammonium ions by 96.5 %, suspended solids by 98 %, and chemical oxygen demand by 91 %. The proposed wastewater treatment scheme will simplify the operation of treatment plants in challenging Arctic conditions and enable their operation in automatic mode.

Keywords: Arctic settlements, domestic wastewater, ammonium ions, physical and chemical treatment station

For citation: Fugaeva A. M., Vialkova E. I. Reagent-based treatment of domestic wastewater for ammonium removal in decentralized Arctic settlements. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):67–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-67-80>



1. Введение / Introduction

Арктическая зона России охватывает 9 регионов (четыре из них входят в состав РФ целиком) площадью 4.8 млн км² (28 % территории страны), где проживает 2.6 млн человек – больше половины населения мировой Арктики¹. В последнее десятилетие Правительство РФ уделяет большое внимание сохранению и восстановлению окружающей среды арктической зоны, где происходят климатические изменения, а также ставит задачи не только по развитию данного региона, но и по устранению негативных последствий активной антропогенной нагрузки и повышению адаптации жизнедеятельности местной флоры и фауны. При этом отмечается низкий уровень доступности качественных социальных услуг и благоустроенного жилья в населенных пунктах, расположенных в отдаленных местностях. Развитие инфраструктуры небольших северных поселений входит в стратегическую программу освоения Российской Арктики².

Благоустройство селитебных территорий сопряжено с прокладкой современных централизованных систем водоснабжения и водоотведения. Следовательно, встает вопрос об утилизации бытовых сточных вод, объем которых существенно возрастает при увеличении нормы водопотребления. Проблемы сбора, отведения, эффективной очистки и выпуска сточных вод в водные объекты рыбохозяйственного значения остаются актуальными для арктических территории как нашей страны, так и всего мира.

Для вновь проектируемых сетей бытовой канализации в небольших поселках характерны наземный или надземный способы прокладки труб, а также большое количество промежуточных насосных станций подкачки. Последнее обстоятельство определяет высокую неравномерность поступления сточных вод на очистку. В холодный период года исходная температура бытовых сточных вод (БСВ) с 16–18 °C может снизиться до 5–7 °C. Привозные стоки от выгребов и септиков в данный период вообще имеют температуру 2–4 °C. Если БСВ не подогревать (а это повышает коммунальное

¹ Российская Федерация. Арктический совет. URL: <https://arctic-council-russia.ru/useful/?ysclid=lg4r3edy6s26890718> (дата обращения: 10.10.2024)

² Указ Президента Российской Федерации от 26.10.2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/45972> (дата обращения: 10.10.2024)

энергопотребление), то традиционные сооружения биологической очистки резко снижают свою эффективность (до 70 % и ниже) по удалению из сточных вод органических веществ из-за ингибирующего влияния низких температур [1]. В результате очистная станция не достигает нормативов качества БСВ по таким показателям, как ХПК, БПК, соединениям азота и фосфора. Особенно плохо поддаются извлечению из сточных вод ионы аммония (ИА), высокая концентрация которых вызывает активную эвтрофикацию водных объектов.

Концентрация ИА в водах природных источников варьирует в интервале от 10 до 200 мкг/дм³ в пересчете на азот. Основными источниками поступления ИА в реки, озера и водохранилища являются неочищенные или плохо очищенные БСВ населенных пунктов, сточные воды коровников, свиноводов и птицеферм, талые и дождевые стоки с сельскохозяйственных полей (при использовании азотных удобрений), а также сточные воды специфических предприятий. С хозяйственно-бытовыми сточными водами в канализационные системы ежедневно поступает до 10 г аммонийного азота в расчете на одного жителя [2]. Предельно допустимая концентрация ИА в воде водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ПДК_в) установлена в размере 1.5 мг/дм³ (в пересчете на азот 1.2 мг/дм³)³, а для водоемов рыбохозяйственного значения – 0.5 мг/дм³ (в пересчете на азот 0.4 мг/дм³)⁴. Согласно Постановлению Правительства РФ № 1430, допустимая концентрация азота аммонийного для водоемов категории Б и В равна 8 мг/дм³ для малых очистных сооружений⁵. Токсичность аммония, проявляемая в водной среде по отношению к микроорганизмам, возрастает с повышением pH [3]. Повышенная концентрация ионов аммония может быть использована в качестве индикаторного показателя, отражающего ухудшение санитарного состояния водного объекта, процесс загрязнения поверхностных и подземных вод в первую очередь бытовыми и сельскохозяйственными стоками.

Одним из наиболее перспективных методов очистки сточных вод от ИА является осаждение аммония в виде нерастворимого гексагидрата магний-аммоний-фосфата, или струвита $\text{NH}_4\text{MgPO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (МАФ). Этот метод обеспечивает высокую степень очистки и позволяет вторично использовать аммиак, поскольку струвит является ценным продуктом и может применяться в качестве удобрения [4]. Для изучения процесса очистки сточных вод авторы проанализировали осаждение МАФ гидрофосфатом натрия, гидроксидом натрия и хлористым магнием. Выяснилось, что максимальная степень очистки сточных вод от ИА достигается при pH = 8.5–10 и незначительном превышении количества осадителей (на 5 %). Оптимальным режимом осаждения МАФ является прямая мгновенная подача реагентов, при этом сначала в сточные воды добавляются растворы Na_2HPO_4 и NaOH, а затем в раствор MgCl_2 [4]. Кроме того, установлено [5], что в основном МАФ образуется при соотношении концентраций ионов $[\text{Ca}^{2+}]:[\text{Mg}^{2+}]$ в сточных водах менее 0.25:1.

³ Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 28.01.2021 года № 2 Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания». URL: <https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 10.10.2024)

⁴ Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 13.12.2016 № 552 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (дата обращения: 10.10.2024)

⁵ Постановление Правительства Российской Федерации от 15.09.2020 г. № 1430 «Об утверждении технологических показателей наилучших доступных технологий в сфере очистки сточных вод с использованием централизованных систем водоотведения поселений или городских округов». URL: <https://docs.cntd.ru/document/565798086> (дата обращения: 10.10.2024)

В статье малазийских авторов [6] для окисления органики БСВ используются процесс Фентона и химическое осаждение аммония. Определено, что при оптимальных условиях осаждения струвита (молярные соотношения: $Mg^{2+}/NH_4^+ = 1$ и $PO_4^{3-}/NH_4^+ = 1$ при $pH = 8.2 \pm 0.1$) концентрация ИА снизилась до 41 ± 7.1 мг/дм³ с первоначальных 298 ± 41 мг/дм³ (эффективность удаления 78.8 %).

Согласно исследованиям [1, 7], сточные воды в сети канализации небольших северных поселений имеют весьма низкие температуры (от +6 до +15 °С) из-за охлаждения в промежуточных насосных станциях и усреднителях без подогрева. Для таких БСВ характерна высокая концентрация загрязнений (например, по взвешенным веществам – 300–5 400 мг/дм³, БПК₅ – 200–1 500 мг/дм³, ХПК – 600–11 000 мг/дм³, ионам аммония – 80–200 мг/дм³) по причине низких суточных норм водопотребления в зимнее время (50–120 л на одного жителя).

Принимая во внимание специфические северные условия и требования нормативных документов⁶, в подобных районах возможна замена этапа биологической очистки на химическую или физико-химическую на очистных сооружениях системы водоотведения. Согласно [8], установки физико-химической очистки предпочтительней устраивать для небольших населенных пунктов, отличающихся большой неравномерностью поступления сточных вод, низкой температурой и концентрацией загрязняющих веществ. В этом случае сооружения будут работать стабильнее, независимо от графика подачи стоков, перепада температур и изменения внешних условий.

За последние несколько десятилетий в России накоплен недостаточно большой опыт внедрения станций физико-химической очистки (СФХО) [3, 9–12] для обработки БСВ (например, в Красноярском крае, где было внедрено более 30 станций), где главными этапами являются реагентная обработка и фильтрование. Но при реализации таких технологических схем СФХО нормативы по удалению ИА и снижению ХПК в очищаемой воде так и не были достигнуты.

В зарубежной практике также имеются методы решения данных проблем. Например, в Канаде разработан биоэлектрохимический анаэробный реактор, позволяющий при любых температурах достигать высокой степени очистки стоков и получать при этом биогаз [13]. В Гренландии и Дании предварительная коагуляция полиалюминий хлоридом позволяла снизить количество взвешенных веществ на 73 %, фосфатов – на 28 % [14, 15]. В штате Аляска (США) предлагают внедрить схему очистки, включающую физико-химическое окисление в присутствии пероксида водорода, что снижает ХПК до 0.7 мг/дм³ [16, 17].

В последнее время за рубежом набирают популярность технологии интенсивного окисления, которые эффективно удаляют загрязнители из сточных вод, а также обеззараживают, что позволяет осуществлять сброс сточных вод в соответствии с действующим законодательством [18].

Примером использования химического метода является окисление азота реагентами, содержащими активный хлор. Активный хлор окисляет находящиеся в сточных водах соединения аммония, аммиака и органические вещества, содержащие аминогруппы до моно- и дихлораминов, а также до треххлористого азота. В статье [19] описан метод окисления ионов аммония гипохлоритом натрия для определения оптимальных условий его проведения в отсутствие и присутствии органических соединений. В проведенных сериях экспериментов максимальная степень удаления ионов аммония составила в отсутствие органических соединений 98 % (минимальная остаточная концентрация – 0.5 мг/дм³) [17].

При использовании технологических схем СФХО для очистки БСВ от ИА в качестве предварительного этапа практически всегда применяется осаждение в сочетании с коагуляцией и флоку-

⁶ СП 32.13330.2018 Канализация. Наружные сети и сооружения: Актуализированная редакция СНиП 2.04.03-85 (с Изменением № 1, 2, 3). URL: <https://docs.cntd.ru/document/554820821> (дата обращения: 10.10.2024)

ляцией. Авторы статьи [20] предлагают схему обработки, включающую первичное осаждение, что приводит к получению верхней надосадочной жидкости и нижнего твердого осадка. Затем вода обрабатывается методом электрохимической очистки, что позволяет получать техническую воду, пригодную для использования в сельском хозяйстве и туалетах (для работы смывных бачков). Получаемый осадок может быть подвергнут биоразложению или физическому воздействию (например, микроволновой обработке). Кроме того, эти методы обеспечивают удовлетворительное удаление БПК ($> 85\%$), ХПК ($81\text{--}91\%$) и патогенных микроорганизмов, а также разложение тяжелых металлов и микрзагрязнителей.

В Испании оптимизация процессов коагуляции и флокуляции на городских очистных сооружениях привела к использованию 25 мг/дм^3 хлорида железа (FeCl_3) в сочетании с 25 мг/дм^3 флокулянта, состоящего из кремния ($\text{SiO}_2 - 3\%$), алюминия ($\text{Al}_2\text{SO}_4 - 64.5\%$) и солей железа ($\text{Fe}_2\text{O}_3 - 32.5\%$), в процессе быстрого смешивания в течение 1 мин при 200 об/мин и медленного перемешивания в течение 30 мин при 30 об/мин с последующим заключительным 30-минутным процессом оседания. Численные и статистические результаты оптимизации процесса достигли 91.5, 59.1 и 95.2 % эффективности удаления мутности, ХПК и взвешенных веществ соответственно. Эти показатели позволяют судить об эффективности улучшенного процесса коагуляции/флокуляции в качестве предварительной обработки для более высокой скорости восстановления NH_4^+ (чуть более 570 мг/дм^3) и уменьшения размеров или замещения других мембранных процессов благодаря высокой величине удаления взвешенных веществ [21].

Итальянские исследователи [22] считают, что весьма перспективным и эффективным способом является адсорбция ИА природным цеолитом, предварительно обработанным хлоридом натрия. Он способен извлекать ионы аммония и удерживать их в своих порах как сорбент. Эффективность цеолита по отношению к ИА зависит от природного состава минерала и способа его модификации.

Таким образом, для очистки БСВ могут применяться следующие основные физико-химические методы удаления ионов аммония и других видов загрязнений: предварительное осаждение с коагулированием, химическое окисление органики, химическое осаждение аммония, фильтрование и сорбция. Эти способы не являются специфичными для какого-либо региона и могут использоваться по всему миру, в том числе в северных климатических условиях и децентрализованных арктических поселениях. Однако с помощью существующих технологий удастся очистить взвешенные вещества, нитриты, нитраты и фосфаты.

Основная проблема, которая не решена предложенными ранее в научном сообществе схемами, это удаление ионов аммония и снижение ХПК до установленных норм, поэтому вопрос обработки фекальных сточных вод остается актуальным. Особенно для арктических поселений с малыми расходами стоков, где стандартные методы очистки не работоспособны.

Научная новизна. В исследовании предложен проект уникальной технологической схемы канализационных очистных сооружений (КОС) с заменой биологического метода на физико-химический метод обработки коммунальных сточных вод, который возможно применять в Арктической зоне.

Цель исследования заключалась в разработке эффективной технологической схемы СФХО для БСВ, схожих по качеству с коммунальными стоками арктических поселков, от ионов аммония и других видов загрязнений до установленных норм. Так как сточные воды поселков Арктической зоны и частной жилой застройки города Тюмени схожи по температурным условиям, объемам стоков и концентрациям различных загрязнений, что подтверждает представленный эксперимент и данные, полученные в исследовании [1], в качестве объекта исследования принята вода из септиков, расположенных в неканализованном районе Тюмени.

Предметом исследования было влияние реагентных методов очистки сточных вод на изменения показателей качества воды (в том числе концентрации ИА) на отдельных этапах моделирования.

При этом изменялись технологические условия, а именно – температура воды, время контакта, дозы реагентов и другие параметры.

2. Материалы и методы / Materials and methods

В лаборатории кафедры инженерных систем и сооружений Тюменского индустриального университета был поставлен эксперимент по лабораторному моделированию процессов физико-химической очистки БСВ от органических веществ, в том числе от ИА.

Авторы предложили следующий порядок технологических процессов очистки бытовых сточных вод, выбранный на основе опубликованных результатов [4, 9] с учетом особенностей децентрализованных поселений:

- 1) предварительная аэрация (обработка сжатым воздухом в течение 20 минут);
- 2) коагуляция с использованием «Аква-Аурат-30» (АА) в сочетании с флокуляцией полиакриламидом (ПАА);
- 3) гравитационное отстаивание взвешенных веществ (ВВ) и продуктов реакции;
- 4) химическое окисление органических веществ с использованием раствора перманганата калия KMnO_4 ;
- 5) механическая фильтрация через слой кварцевого песка (размер гранул от 0.5 до 1.7 мм);
- 6) химическое осаждение ионов аммония с помощью раствора гидрофосфата натрия Na_2HPO_4 и раствора хлорида магния MgCl_2 при $\text{pH} = 9-10$ и получение осадка – струвита;
- 7) сорбционная фильтрация через слой гранулированного активированного угля (размер гранул от 1 до 3 мм).

Эксперимент производился по плану, представленному в таблице 1, с разбивкой на этапы очистки сточных вод. По результатам измерения контрольных показателей выбирался лучший вариант технологии очистки, определялись оптимальные параметры и сравнивалась эффективность очистки воды в нормальных (при $T = 18-22^\circ\text{C}$) и в экстремальных (при $T = 3-6^\circ\text{C}$) температурных условиях.

Таблица 1. План эксперимента по физико-химической очистке хозяйственно-фекальных стоков
Table 1. Experimental plan for physical and chemical treatment of domestic sewage

Наименование процесса	Код	Технология
1. Коагулирование сточных вод		
Коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 18-22^\circ\text{C}$	А	Вода должна иметь $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$, затем добавляются коагулянт (АА дозой 70 мг/дм ³) и флокулянт (ПАА дозой 1 мг/дм ³), смешиваются быстро в течение 1 мин со скоростью 2–3 об/сек, затем скорость понижается до 0.5 об/сек и проба медленно перемешивается еще 20 мин; далее смесь отстаивается 60 мин
Коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 3-6^\circ\text{C}$	Б	Вода охлаждается до $T = 4 \pm 1^\circ\text{C}$, затем добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм ³) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм ³), смешивается быстро 1 мин, затем перемешивается медленно 20 мин и отстаивается 60 мин
Преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 18-22^\circ\text{C}$	В	Вода должна быть $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$. Вода аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, затем добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм ³) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм ³), смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин
Преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 3-6^\circ\text{C}$	Г	Вода охлаждается до $T = 4 \pm 1^\circ\text{C}$, затем аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм ³) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм ³); проба смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин
Окисление + преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 18-22^\circ\text{C}$	Д	Вода должна быть $T = 20 \pm 2^\circ\text{C}$. В пробу добавляется раствор окислителя KMnO_4 дозой 10 мг/дм ³ . Вода аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, затем добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм ³) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм ³), проба смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин

Наименование процесса	Код	Технология
Окисление + преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание при $T = 3-6^{\circ}\text{C}$	Е	Вода охлаждается до $T = 4 \pm 1^{\circ}\text{C}$. В пробу добавляется раствор окислителя KMnO_4 дозой 10 мг/дм^3 . Вода аэрируется в течение 20 мин сжатым воздухом, затем добавляется коагулянт (АА – 70 мг/дм^3) и флокулянт (ПАА – 1 мг/дм^3), проба смешивается быстро 1 мин, затем медленно 20 мин; смесь отстаивается 60 мин
2. Химическое окисление очищенной воды в процессе коагуляции		
Химическое окисление + механическое фильтрование через песок при $T = 18-22^{\circ}\text{C}$	Ж	Предварительно очищенная вода должна иметь $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Добавляется раствор KMnO_4 дозой 10 мг/дм^3 , смешивается быстро 1 мин и еще медленно 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
Химическое окисление + механическое фильтрование через песок при $T = 3-6^{\circ}\text{C}$	З	Вода охлаждается до $T = 5 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Добавляется раствор KMnO_4 дозой 10 мг/дм^3 , смешивается быстро 1 мин и еще медленно 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
Химическое окисление + барботаж воздухом + механическое фильтрование через песок при $T = 18-22^{\circ}\text{C}$	И	Предварительно очищенная вода должна иметь $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Добавляется раствор KMnO_4 дозой 10 мг/дм^3 , смешивается быстро 1 мин и барботируется сжатым воздухом 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
Химическое окисление + барботаж воздухом + механическое фильтрование через песок при $T = 3-6^{\circ}\text{C}$	К	Вода охлаждается до температуры $T = 5 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Добавляется раствор KMnO_4 дозой 10 мг/дм^3 , смешивается быстро 1 мин и барботируется сжатым воздухом 20 мин; смесь фильтруется через предварительно промытый слой песка
3. Химическое осаждение ионов аммония в воде после химического окисления		
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь при $T = 18-22^{\circ}\text{C}$	Л	Вода должна быть $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Вводится гидрофосфат натрия Na_2HPO_4 и хлорид магния MgCl_2 . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором NaOH до $\text{pH} = 9$. Далее мешают 5 мин и отстаивают 60 мин. Затем отстой фильтруют через слой предварительно промытого активированного угля
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь при $T = 3-6^{\circ}\text{C}$	М	Вода охлаждается до $T = 5 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Вводится гидрофосфат натрия Na_2HPO_4 и хлорид магния MgCl_2 . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором NaOH до $\text{pH} = 9$. Далее мешают 5 мин и отстаивают 60 мин. Затем отстой фильтруют через слой предварительно промытого активированного угля
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь + вторичная коагуляция при $T = 18-22^{\circ}\text{C}$	Н	Вода должна быть $T = 20 \pm 2^{\circ}\text{C}$. Вводится гидрофосфат натрия Na_2HPO_4 и хлорид магния MgCl_2 . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором NaOH до $\text{pH} = 9$. Далее мешают медленно 10 мин, добавляют АА дозой 30 мг/дм^3 и отстаивают 60 мин. Затем фильтрация через уголь
Химическое осаждение аммония + сорбционное фильтрование через уголь + вторичная коагуляция при $T = 3-6^{\circ}\text{C}$	О	Вода охлаждается до $T = 5 \pm 1^{\circ}\text{C}$. Вводится гидрофосфат натрия Na_2HPO_4 и хлорид магния MgCl_2 . Полученный раствор перемешивается в течение 1 мин, затем подщелачивается 10%-м раствором NaOH до $\text{pH} = 9$. Далее мешают медленно 10 мин, добавляют АА дозой 30 мг/дм^3 и отстаивают 60 мин. Затем фильтрация через уголь

Особенность эксперимента заключалась в том, что данное исследование проводилось в течение трех недель, при этом каждую неделю использовались свежие сточные воды, поэтому есть некоторые различия в исходных показателях сточных вод, не превышающие 10 %. Эффективность того или иного этапа очистки оценивалась по следующим характерным показателям: pH; концентрация ВВ, ХПК, ИА, нитритов, нитратов, фосфатов, хлоридов и сульфатов; дополнительно измерялись мутность, цветность и объем выпавшего осадка. Определение численных значений показателей производилось согласно действующим методикам анализа жидкости ПНД Ф.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

На первом этапе экспериментального моделирования была изучена эффективность предварительного окисления, преаэрации и коагуляции сточных вод для двух температурных режимов

Таблица 2. Результаты первого этапа эксперимента
Table 2. Results of the first stage of the experiment

Наименование показателя	Вход	Коды процессов					
		А	Б	В	Г	Д	Е
рН	7.14	6.79	6.87	7.30	7.26	7.42	7.29
Взвешенные вещества, мг/дм ³	440	315	270	255	230	269	261
ХПК, мг/дм ³	490	350	300	284	256	300	290
Аммония-ион, мг/дм ³	82.45	28.95	48.44	88.22	61.34	84.74	86.19
Нитрит-ион, мг/дм ³	0.28	Менее 0.1	Менее 0.1	0.18	0.25	0.30	0.33
Нитрат-ион, мг/дм ³	1.42	1.37	5.96	2.51	1.22	3.06	2.89
Фосфат-ион, мг/дм ³	19.42	1.7	1.11	4.48	0.98	4.4	2.2
Хлориды, мг/дм ³	100.5	171.3	170.8	171.9	178.7	166.2	171.3
Сульфаты, мг/дм ³	19.35	13.2	13.26	14.28	18.37	15.85	16.87
Объем осадка, дм ³	–	0.025	0.029	0.031	0.032	0.029	0.030

(нормального и экстремального). Качество исходной сточной воды (на входе) и результаты первого этапа для процессов А–Е, согласно кодировке в таблице 1, представлены в таблице 2.

На первом этапе была поставлена задача максимально снизить содержание ВВ и ХПК. Как показал эксперимент, предварительное окисление в сочетании с первичной коагуляцией не дали должного результата, поэтому для дальнейшего исследования была принята следующая последовательность: преаэрация + коагуляция + флокуляция + отстаивание (это процессы В и Г, в результате которых получен наилучший эффект по ХПК).

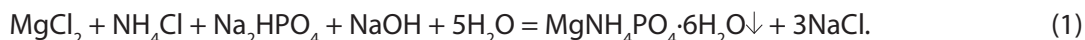
Вторым этапом эксперимента исследована эффективность химического окисления предварительно очищенных проб воды (после аэрации, коагуляции/флокуляции и осаждения). Реагентная обработка проводилась согласно детальному описанию процессов Ж–К в таблице 1. Исходное качество воды и результаты второго этапа моделирования представлены в таблице 3.

Таблица 3. Результаты второго этапа эксперимента
Table 3. Results of the second stage of the experiment

Наименование показателя	Исходное качество сточных вод		Коды процессов					
	После процесса А	После процесса Б	В	Г	Ж	З	И	К
рН	7.05	7.15	6.88	6.86	7.27	7.32	7.98	7.71
Взвешенные вещества, мг/дм ³	160	300	104	172	59	109	51	82
ХПК, мг/ дм ³	390	452	250	259	141	164	126	123
Ион аммония, мг/ дм ³	29.4	28.6	35.6	36.4	19	21	18.2	17.2
Мутность, мг/ дм ³	89.78	78.42	4.47	7.71	2.44	2.2	1.57	2.32
Цветность, град	360.78	350.76	54.5	62.98	45.65	41.71	31.61	35.27

Варианты с химическим окислением при барботаже сжатым воздухом (процессы И и К) дают наилучшие значения концентрации ИА (сокращение в 1.6–1.7 раза), ВВ (в 3.6–5.8 раза), ХПК (почти в 3.7 раза), при этом наблюдается существенное снижение цветности и мутности (на 90–98 %). Показатель среды рН находится в допустимых пределах во всех опытах (6.5–8.5). Но при этом требуемые значения качества до сих пор не были достигнуты. На основании полученных данных к дальнейшему эксперименту приняты варианты И и К, согласно кодировке в таблице 1.

Третьим этапом было рассмотрено химическое осаждение ИА путем добавления в воду реагентов, содержащих фосфат-ионы (гидрофосфат натрия) и ионы магния (хлорид магния), с последующим осаждением МАФ, или струвита, в щелочной среде по следующему механизму [4]:



Учитывая, что для получения струвита $\text{MgNH}_4\text{PO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ реагенты подаются в молярном соотношении $\text{Mg}:\text{NH}_4:\text{PO}_4 = 1:1:1$, вычислено количество реагентов (на 1 дм^3 сточных вод):

$$\frac{m_{\text{ха}}}{M_{\text{ха}}} = \frac{X1}{M_{\text{хм}}} \rightarrow \frac{0.191}{53} = \frac{X1}{95} \rightarrow X1 = 0.342 \text{ (г.)}; \quad (2)$$

$$\frac{m_{\text{ха}}}{M_{\text{ха}}} = \frac{X2}{M_{\text{зфн}}} \rightarrow \frac{0.191}{53} = \frac{X2}{142} \rightarrow X2 = 0.512 \text{ (г.)}, \quad (3)$$

где $m_{\text{ха}}$ – масса хлорида аммония;

$M_{\text{ха}}$ – молярная масса хлорида аммония;

$M_{\text{хм}}$ – молярная масса хлорида магния;

$M_{\text{зфн}}$ – молярная масса гидрофосфата натрия;

$X1$ – масса хлорида магния;

$X2$ – масса гидрофосфата натрия.

Для интенсификации осаждения производили подщелачивание 10%-м раствором гидроксида натрия NaOH . После перемешивания в течение 1 мин и 60-минутного отстаивания получался осадок белого цвета – струвит, который представляет из себя удобрение для почвы (рис. 1). В завершение, с целью удаления остаточных загрязнений пробы воды, были профильтрованы через слой гранулированного активированного угля. Исходные данные (вход) и лучшие результаты по всем этапам моделирования для разных процессов представлены в таблице 4.

Вторичная коагуляция повысила эффект осаждения аммония, но при этом увеличила содержание ХПК и цветности. На следующем этапе работ планируется подбор коагулянтов для вторичной обработки воды и контроль дополнительных показателей с учетом выхода вторичных загрязнений, который происходит в результате применения реагентов.

Проводилось сравнение влияния температуры на очистку сточных вод от загрязнений для теплой ($T = 18\text{--}22^\circ\text{C}$) и холодной ($T = 3\text{--}6^\circ\text{C}$) воды. Результаты показывают, что при изначально не-

сколько разных концентрациях показателей качества исходной воды концентрации на выходе приблизительно равны. Изменение температуры воды в нормальных и экстремальных условиях мало влияет на конечный результат.

Концентрация взвешенных веществ в воде снизилась на 98 %. После механического фильтрования (этапы И и К) предложенная схема одинаково эффективна независимо от качества исходной воды. При практической реализации это может отразиться только на сроке службы загрузки фильтров и количестве циклов промывок загрузки. Концентрация ХПК снижается более чем в 10 раз, при этом общая эффективность уда-

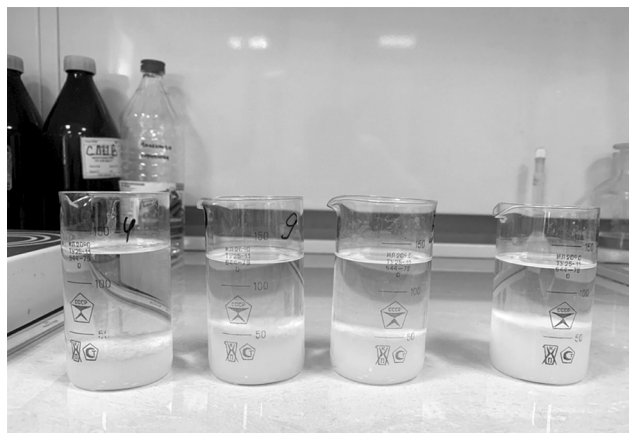


Рис. 1. Химическое осаждение ионов аммония
Fig. 1. Chemical precipitation of ammonium ions

Таблица 4. Результаты эксперимента по всем этапам очистки
Table 4. Results of the experiment across all treatment stages

Показатель	Теплая вода Т = 18–22 °С (нормальные условия)					Холодная вода Т = 3–6 °С (экстремальные условия)				
	Вход	Код процесса				Вход	Код процесса			
		В	И	Л	Н		Г	К	М	О
рН	6.78	6.92	7.95	9.05	9.13	7.01	6.83	7.77	9	9.25
ВВ, мг/дм ³	190	70	16	5	2	160	30	17	4	3
ХПК, мг/дм ³	850	445	395	57.4	77.5	956	435	391	75.5	86.3
Аммоний-ион, мг/дм ³	58	64.2	60.1	5.48	2.36	63.27	66.2	70.3	2.7	2.2
Нитрит-ионы, мг/дм ³	0.2	–	–	0.2	0.2	0.2	–	–	0.2	0.2
Нитрат-ионы мг/дм ³	1.1	–	–	0.48	0.82	1	–	–	0.96	0.87
Мутность, мг/дм ³	94.02	25.87	2.73	1.74	0	92.22	8.47	3.19	0.93	0
Цветность, град	370	170	51	11.2	0.75	373	84	56	7.8	2.3
Хлориды, мг/дм ³	87.86	–	–	2173	3735	88.49	–	–	3766	3918
Сульфаты, мг/дм ³	19.69	–	–	160.1	117.36	29.6	–	–	139	94.72
Фосфаты, мг/дм ³	20.05	–	–	0.88	0.25	17.87	–	–	0.25	0.25

ления химически окисляемых органических веществ составляет 91 %. После коагуляции и осаждения (этапы А и Б) вода становится примерно одинаковой по качеству независимо от расхождений в показателях на входе. Это говорит о том, что предложенная схема коагуляции и флокуляции весьма эффективна при значительном превышении среднего значения концентрации ХПК, что обычно наблюдается при поступлении бытовых сточных вод. Некоторый рост ХПК (на 10–20 мг/дм³) после вторичной коагуляции (этапы очистки Н и О) очевидно связан с поступлением в воду органических молекул флокулянта ПАА. Экспериментальные данные показали, что дополнительная коагуляция после химического осаждения ионов аммония вносит в воду вторичное загрязнение. На основании этого было решено в дальнейшем отказаться от этапов вторичной коагуляции.

Рис. 2 представляет графики изменения содержания ионов аммония после каждого этапа очистки. Общий достигаемый эффект для ионов аммония составил 96.5 %. Рост аммония на стадиях

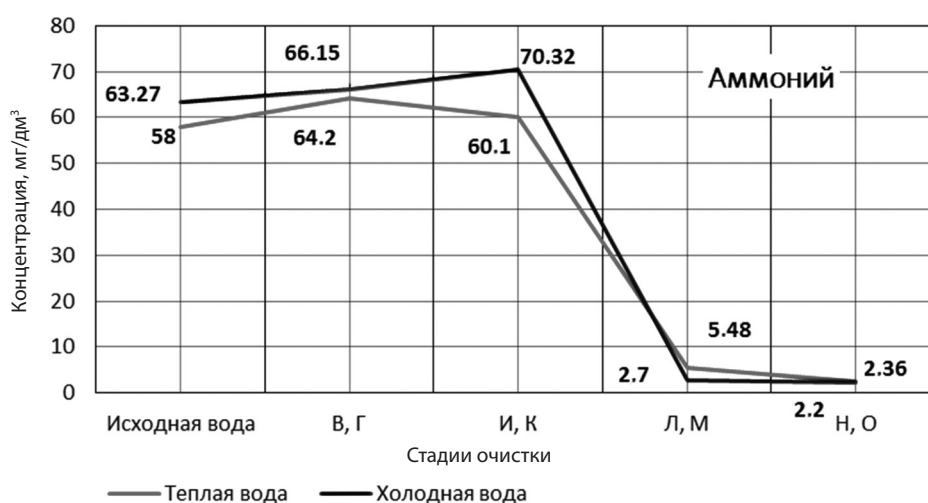


Рис. 2. Изменение концентрации ионов аммония на этапах очистки для теплой (18–22 °С) и холодной (3–6 °С) воды

Fig. 2. Change in ammonium ion concentration at treatment stages for warm (18–22 °С) and cold (3–6 °С) water

очистки В, Г, И и К связан со снижением влияния других видов загрязнений, которые присутствуют в сточных водах и удаляются в процессе коагуляции, флокуляции и отстаивания. Очевидно, что основное удаление ионов аммония происходит на стадии химического осаждения.

Общая схема процессов очистки БСВ, предложенная на основе лабораторного моделирования физико-химических процессов и выбора лучших вариантов, представлена на рис. 3. Данная схема вполне может послужить основой для проектирования СФХО бытовых сточных вод небольших населенных пунктов. Последовательность выбранных процессов следующая: преаэрация – коагуляция – отстаивание – окисление – фильтрование через песок – химическое осаждение аммония (получение струвита) – фильтрование через активированный уголь.

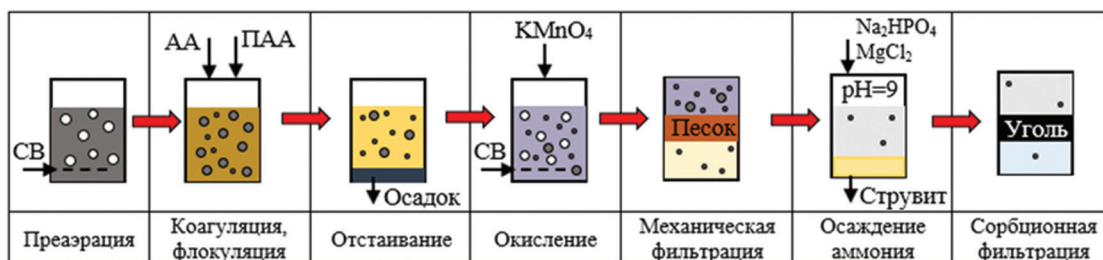


Рис. 3. Технологическая схема СФХО (СВ – сжатый воздух, АА – «Аква-Аурат-30», ПАА – полиакриламид)

Fig. 3. Process flow diagram of the physical and chemical treatment system

(СВ – compressed air, АА – «Aqua-Aurat-30», ПАА – polyacrylamide)

При практической реализации данной схемы в завершение необходимо добавить обеззараживание и стабилизацию pH (на последних этапах наблюдалось повышение pH до 9–9.25; это может быть связано со спецификой угольной загрузки). Также необходимы сооружения для сбора, обработки и утилизации осадков. При этом осадки на разных ступенях очистки имеют разный состав и свойства: осадок после коагуляции является отходом и подлежит дополнительной специальной обработке; осадок после химического осаждения аммония представляет собой готовое удобрение для сельскохозяйственных нужд – струвит. Общий объем обезвоженного осадка будет составлять не более 0.5 % от производительности станции очистки.

4. Заключение / Conclusions

Предложенная технологическая схема очистки БСВ, включающая в себя преаэрацию, отстаивание взвеси с коагуляцией и флокуляцией, химическое окисление и осаждение струвита, а также механическое и сорбционное фильтрование, показала высокую эффективность удаления ионов аммония (на 96.5 %), взвешенных веществ (на 98 %) и ХПК (на 91 %) (кодировки процессов В, И, Л и Г, К, М для теплой и холодной сточной воды соответственно). В результате научной работы удалось добиться показателей качества БСВ, разрешенной правительством Российской Федерации согласно Постановлению от 15.09.2020 г. № 1430, для сброса в водный объект категории В малыми и сверхмалыми очистными сооружениями (ВВ не более 15 мг/дм³, ХПК – 80, азот аммонийный – 8). Выяснилось, что данная технология мало зависит от температуры воды и пригодна для бытовых сточных вод с температурой от 3 до 22 °С. Этот факт позволяет применять разработанную технологическую схему для СФХО децентрализованных систем канализации в отдаленных арктических поселениях. В данном случае отсутствует биохимическая очистка, что существенно упрощает эксплуатацию станции и делает возможной ее работу в автоматическом режиме.

В результате химического осаждения ионов аммония получается новый продукт – струвит, который служит удобрением для сельскохозяйственных. Однако добавление в воду большого количества реагентов (хлорида магния и гидрофосфата натрия) ведет ко вторичному загрязнению сточных вод

и требует контроля таких веществ, как магний, натрий, хлориды и сульфаты. В дальнейшем стоит задача по определению оптимальных доз коагулянтов и реагентов, дающих минимальное вторичное загрязнение обрабатываемой воды.



Вклад авторов. Авторы сделали эквивалентный 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. Вялкова Е. И., Максимова С. В., Землянова М. В., Воротникова А. В., Максимов Л. И. *Водоотведение объектов инфраструктуры нефтегазовых месторождений Западной Сибири*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2017. 175 с.
2. Руфова А. А., Татарникова А. В. Антропогенное влияние на гидрохимическое и гидробиологическое состояние поверхностных вод северных городов (на примере г. Якутска). *Современные проблемы науки и образования*. 2015;(4):503. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20468>.
3. Фугаева А. М., Воронов А. А., Вялкова Е. И. Очистка бытовых сточных вод малых населенных пунктов. В сб.: *Современные проблемы земельно-имущественных отношений, урбанизации территории и формирования комфортной городской среды: сборник докладов Международной научно-практической конференции, Тюмень, 2023*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет, 2023. С. 443–450. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55923907>.
4. Lobanov S. A., Poilov V. Z. Treatment of wastewater to remove ammonium ions by precipitation. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2006;79(9):1473–1477. <https://doi.org/10.1134/S1070427206090151>
5. Mitani Y., Sakai Y., Mishina F., Ishiduka S. Struvite recovery from wastewater having low phosphate concentration. *Journal of Water and Environment Technology*. 2003;1(1):13–18. <https://doi.org/10.2965/jwet.2003.13>
6. Sea Y. F., Chua A. S. M., Ngho G. Ch., Rabuni M. F. Integrated struvite precipitation and fenton oxidation for nutrient recovery and refractory organic removal in palm oil mill effluent. *Water*. 2024;16(13):1788. <https://doi.org/10.3390/w16131788>
7. Glushchenko E., Vialkova E., Sidorenko O., Fugaeva A. Physical-chemical wastewater treatment in Arctic conditions. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:02014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702014>
8. Hendriksen K., Hoffmann B. Greenlandic water and sanitation systems – identifying system constellation and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(33):32964–32974. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9556-6>
9. Мочалов И. П. *Очистка и обеззараживание сточных вод малых населенных мест (в условиях Крайнего Севера)*. 2-е изд., доп. и перераб. Москва: ДАР/ВОДГЕО; 2016. 466 с.
10. Зверева С. М., Бартова Л. В. Развитие технологии очистки сточных вод малых населенных пунктов. *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. 2017;8(2):64–74. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.2.06>
11. Гришин Б. М., Кошев А. Н., Ласьков Н. Н., Бикунова М. В. Удаление соединений азота из сточных вод с применением окислителей. *Региональная архитектура и строительство*. 2013;(2):91–97.
12. Андреев С. Ю., Исаева А. М., Кочергин А. С. *Разработка и исследование комбинированной технологии очистки сточных вод малых населенных пунктов*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2015. 120 с.
13. Ragush C., Schmidt J., Krkošek W. H., Gagnon G. A., Hansen L. T., Jamieson R. Performance of municipal waste stabilization ponds in the Canadian Arctic. *Ecological Engineering*. 2015;83(12):413–421. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.008>
14. Koivunen J., Heinonen-Tanski H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters. *Water Research*. 2005;39(18):4445–4453 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.08.016>
15. Chhetri R. K., Klupsch E., Andersen H. R., Jensen P. E. Treatment of Arctic wastewater by chemical coagulation, UV and peracetic acid disinfection. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:32851–32859. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8585-5>
16. Wu T., Englehardt J. D., Guo T., Gassie L. W., Dotson A. D. Applicability of energy-positive net-zero water management in Alaska: technology status and case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:33025–33037. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0743-2>

17. Вялкова Е. И., Глущенко Е. С., Велижанина Т. С., Осипова Е. Ю. Анализ физико-химических методов очистки бытовых сточных вод северных населенных пунктов. *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. 2020;22(1):152–163. <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163>
18. Lado Ribeiro A. R., Rodríguez-Chueca J., Giannakis S. Urban and industrial wastewater disinfection and decontamination by advanced oxidation processes (AOPs): Current issues and future trends. *Water*. 2021;13(4):560. <http://dx.doi.org/10.3390/w13040560>
19. Небукина И. А., Смирнова Н. Н., Рвачев И. С. Влияние органических соединений на эффективность удаления ионов аммония из сточных вод методом окисления. *Вопросы современной науки и практики. Университет им. В. И. Вернадского*. 2015;(2):28–33. <https://doi.org/10.17277/voprosy.2015.02.pp.028-033>
20. Anusuyadevi P. R., Kumar D. Ja. P., Omkaara Jyothi A. D. H. V., Patwardhan N. S., Janani V., Mol A. Towards viable eco-friendly local treatment of blackwater in sparsely populated regions. *Water*. 2023;15(3):542. <https://doi.org/10.3390/w15030542>
21. Barros A., Vecino X., Reig M., Cortina J. L. Coagulation and flocculation optimization process applied to the sidestream of an urban wastewater treatment plant. *Water*. 2022;14(24):4024. <https://doi.org/10.3390/w14244024>
22. Muscarella S. M., Laudicina V. A., Badalucco L., Conte P., Mannina G. Ammonium recovery from synthetic wastewaters by using zeolitic mixtures: a desorption batch-study. *Water*. 2023;15(19):3479. <https://doi.org/10.3390/w15193479>

References

1. Vialkova E. I., Maksimova S. V., Zemlyanova M. V., Vorotnikova A. V., Maksimov L. I. *Drainage of infrastructure facilities of oil and gas fields in Western Siberia*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2017. (In Russ.)
2. Rufova A. A., Tatarinova A. V. Anthropogenous influence on the hydrochemical and hydrobiological condition of the surface water of the northern cities (on the example of Yakutsk). *Modern problems of science and education*. 2015;(4):503. (In Russ.) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=20468>.
3. Fugaeva A. M., Voronov A. A., Vialkova E. I. Purification of domestic wastewater from small settlements. In: *Sovremennyye problemy zemel'no-imushchestvennykh otnosheniy, urbanizatsii territorii i formirovaniya komfortnoy gorodskoy sredy: sbornik dokladov Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii, Tyumen, 2023 = Modern problems of land and property relations, urbanization of the territory and the formation of a comfortable urban environment: Collection of reports of the International Scientific and Practical Conference, Tyumen, 2023*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2023. P. 443–450. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=55923907>.
4. Lobanov S. A., Poilov V. Z. Treatment of wastewater to remove ammonium ions by precipitation. *Russian Journal of Applied Chemistry*. 2006;79(9):1473–1477. <https://doi.org/10.1134/S1070427206090151>
5. Mitani Y., Sakai Y., Mishina F., Ishiduka S. Struvite recovery from wastewater having low phosphate concentration. *Journal of Water and Environment Technology*. 2003;1(1):13–18. <https://doi.org/10.2965/jwet.2003.13>
6. Sea Y. F., Chua A. S. M., Ngoh G. Ch., Rabuni M. F. Integrated struvite precipitation and fenton oxidation for nutrient recovery and refractory organic removal in palm oil mill effluent. *Water*. 2024;16(13):1788. <https://doi.org/10.3390/w16131788>
7. Glushchenko E., Vialkova E., Sidorenko O., Fugaeva A. Physical-chemical wastewater treatment in Arctic conditions. *E3S Web of Conferences*. 2020;157:02014. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202015702014>
8. Hendriksen K., Hoffmann B. Greenlandic water and sanitation systems – identifying system constellation and challenges. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25(33):32964–32974. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9556-6>
9. Mochalov I. P. *Wastewater treatment and disinfection for small settlements (in the Far North)*. 2nd edition, revised. Moscow: DAR/VODGEO; 2016. (In Russ.)
10. Zvereva S. M., Bartova L. V. Developing wastewater treatment technologies for small agglomerations. *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. 2017;8(2):64–74. <https://doi.org/10.15593/2224-9826/2017.2.06>
11. Grishin B. M., Koshev A. N., Laskov N. N., Bikunova M. V. Azot compounds removal out of sewage using oxidizers. *Regional Architecture and Engineering*. 2013;(2):91–97. (In Russ.)
12. Andreev S. Yu., Isaeva A. M., Kochergin A. S. *Development and investigation of combined wastewater treatment technology for small settlements*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2015. (In Russ.)
13. Ragush C., Schmidt J., Krkošek W. H., Gagnon G. A., Hansen L. T., Jamieson R. Performance of municipal waste stabilization ponds in the Canadian Arctic. *Ecological Engineering*. 2015;83(12):413–421. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2015.07.008>
14. Koivunen J., Heinonen-Tanski H. Peracetic acid (PAA) disinfection of primary, secondary and tertiary treated municipal wastewaters. *Water Research*. 2005;39(18):4445–4453 <https://doi.org/10.1016/j.watres.2005.08.016>

15. Chhetri R. K., Klupsch E., Andersen H. R., Jensen P. E. Treatment of Arctic wastewater by chemical coagulation, UV and peracetic acid disinfection. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:32851–32859. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8585-5>
16. Wu T., Englehardt J. D., Guo T., Gassie L. W., Dotson A. D. Applicability of energy-positive net-zero water management in Alaska: technology status and case study. *Environmental Science and Pollution Research*. 2018;25:33025–33037. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-0743-2>
17. Vialkova E. I., Glushchenko E. S., Velizhanina T. S., Osipova E. Y. Analysis of physicochemical wastewater treatment in Arctic zones. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Journal of Construction and Architecture*. 2020;22(1):152–163. (In Russ.) <https://doi.org/10.31675/1607-1859-2020-22-1-152-163>
18. Lado Ribeiro A. R., Rodríguez-Chueca J., Giannakis S. Urban and industrial wastewater disinfection and decontamination by advanced oxidation processes (AOPs): Current issues and future trends. *Water*. 2021;13(4):560. <http://dx.doi.org/10.3390/w13040560>
19. Nebukina I. A., Smirnova N. N., Rvachev I. S. The effect of organic compounds on removal efficiency of ammonium ions from wastewater by oxidation method. *Voprosy sovremennoy nauki i praktiki. Universitet im. V. I. Vernadskogo*. 2015;(2):28–33. <https://doi.org/10.17277/voprosy.2015.02.pp.028-033>
20. Anusuyadevi P. R., Kumar D. Ja. P., Omkaara Jyothi A. D. H. V., Patwardhan N. S., Janani V., Mol A. Towards viable eco-friendly local treatment of blackwater in sparsely populated regions. *Water*. 2023;15(3):542. <https://doi.org/10.3390/w15030542>
21. Barros A., Vecino X., Reig M., Cortina J. L. Coagulation and flocculation optimization process applied to the sidestream of an urban wastewater treatment plant. *Water*. 2022;14(24):4024. <https://doi.org/10.3390/w14244024>
22. Muscarella S. M., Laudicina V. A., Badalucco L., Conte P., Mannina G. Ammonium recovery from synthetic wastewaters by using zeolitic mixtures: a desorption batch-study. *Water*. 2023;15(19):3479. <https://doi.org/10.3390/w15193479>



Информация об авторах

Фугаева Анастасия Михайловна, ассистент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, nastyafugaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7097-1775>

Вялкова Елена Игоревна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры инженерных систем и сооружений, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, vyalkova-e@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2232-1107>

Information about the authors

Anastasiia M. Fugaeva, Assistant in the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, nastyafugaeva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-7097-1775>

Elena I. Vialkova, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Engineering Systems and Structures, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, vyalkova-e@yandex.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2232-1107>

Получена 24 декабря 2024 г., одобрена 17 февраля 2025 г., принята к публикации 06 марта 2025 г.

Received 24 December 2024, Approved 17 February 2025, Accepted for publication 06 March 2025



Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа

Н. О. Борисов ✉, О. Н. Столяров

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, 29, Санкт-Петербург, 194064, Российская Федерация

✉ borisov.n@edu.spbstu.ru



Аннотация. Текстильное армирование бетонных конструкций является одним из перспективных направлений современного строительства. Такие конструкции являются легкими, прочными, устойчивыми, требуют меньшего количества материалов. Однако использование текстильно-армированного бетона в консольных конструкциях ранее не изучалось. Авторы спроектировали и изготовили прототипы облегченных бетонных покрытий консольного типа с текстильным армированием. Прототипы прошли экспериментальную проверку на прочность в лабораторных условиях, также было проведено конечно-элементное моделирование для анализа напряженно-деформированного состояния конструкций. Результаты показали, что максимальная сила разрушения прототипа составила 400 Н, что эквивалентно напряжению в 4.08 МПа и превышает показатели бетона класса В20 в 1.9–2.4 раза. Эффективность текстильного армирования была подтверждена в условиях критических нагрузок, при этом остаточная прочность конструкции обеспечила устойчивость после разрушения бетонной матрицы. Прототип может быть использован как основа для разработки коммерческих решений. Технология перспективна для применения в регионах с повышенными требованиями к надежности конструкций, включая сейсмоактивные зоны.

Ключевые слова: текстильно-армированный бетон, щелочестойкая стеклянная сетка, консольные конструкции, облегченные бетонные покрытия, остаточная прочность

Для цитирования: Борисов Н. О., Столяров О. Н. Преимущества применения текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):81–92. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92> EDN: QMXDMF

Advantages of using textile-reinforced concrete in cantilever structures

Nikita O. Borisov ✉, Oleg N. Stolyarov

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, 29 Politechnicheskaya St., Saint Petersburg, 194064, Russian Federation

✉ borisov.n@edu.spbstu.ru



Abstract. Textile reinforcement of concrete structures is promising trend in modern construction. These structures are lightweight, strong, stable, and require fewer materials. However, the use of textile-reinforced concrete in cantilever structures has not been previously studied. The authors designed and manufactured prototypes of lightweight textile-reinforced concrete cantilever coverings. The prototypes underwent strength testing in the laboratory. In addition, finite element modelling was performed to analyze the stress-strain state of the structures. The results showed that the maximum failure load of the prototype was 400 N, equivalent

to a stress of 4.08 MPa, exceeding the strength of B20 class concrete by 1.9-2.4 times. The effectiveness of textile reinforcement was demonstrated under critical loading conditions, and the residual strength of the structure provided stability after the concrete matrix failure. The prototype could form the basis of commercial solutions. This technology is promising for use in regions with stringent structural reliability requirements, including seismically active zones.

Keywords: textile-reinforced concrete, alkali-resistant glass mesh, cantilever structures, lightweight concrete covers, residual strength

For citation: Borisov N. O., Stolyarov O. N. Advantages of using textile-reinforced concrete in cantilever structures. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):81–92. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-81-92>



1. Введение / Introduction

Традиционные строительные материалы, такие как железобетон и сталь, остаются основой современного строительства благодаря прочности и долговечности. Однако использование этих материалов связано с рядом проблем: большим весом, необходимостью значительных материальных затрат на поддержание конструкций в период эксплуатации, а также подверженностью стали коррозии, что требует постоянного обслуживания. Кроме того, традиционные материалы могут ограничивать архитектурные решения, препятствуя созданию сложных и инновационных конструкций.

Современные требования к строительным конструкциям стимулируют разработку новых материалов, которые способны минимизировать использование ресурсов и улучшить механические характеристики конструкций. Преимуществом таких материалов является повышение гибкости проектных решений. Один из перспективных материалов – текстильно-армированный бетон (ТАБ), который сочетает прочность бетона с легкостью и гибкостью текстильной арматуры. Это позволяет создавать более легкие и устойчивые конструкции, которые могут покрывать большие пролеты без утраты структурной целостности.

Замена стальной арматуры на текстильную из высокопрочных волокон является одним из способов сокращения получаемых объемов бетона [1]. Основными применяемыми армирующими материалами являются сетки из щелочестойких стеклянных и углеродных нитей (ровингов) [2].

В исследовании [3] приведена характеристика сдвиговых свойств текстильных армирующих материалов, работа [4] изучает влияние конструктивных параметров армирующих тканей на прочность высокопроизводительных ровингов в цементных композитах. Кроме того, активно исследуются методы минимизации отходов при производстве строительных элементов. В работе [5] проведен количественный анализ влияния различных методов предварительного изготовления строительных элементов на сокращение строительных отходов, что подчеркивает важность оптимизации производственных процессов. В статье [6] описаны результаты исследований, демонстрирующие возможности создания легких и устойчивых элементов с минимальным использованием материалов. Обзор [7] акцентирует внимание на методах снижения материальных отходов в строительстве, включая использование инновационных технологий и подходов. Поскольку данные армирующие материалы не подвержены коррозии, бетон, армированный текстильной арматурой, требует лишь минимального количества бетонного покрытия для обеспечения требований к защитному слою [8, 9].

ТАБ обладает высоким потенциалом для реализации конструкций с минимальным использованием материалов. Например, армирование может изготавливаться из непрерывных ровингов из стекловолокна или углеродных волокон и покрываться жидким стеклом или эпоксидной смолой. В результате достигается предел прочности до 3 000–4 000 МПа, что кратно превышает предел прочности арматурной стали. Текстильная арматура из углеродных нитей, в частности, востребована в бе-

тонном строительстве из-за нечувствительности к коррозии и низкой плотности. Более подробная информация о текущем состоянии исследований ТАБ обобщена в [6, 10–12].

Процессы аддитивного производства с цифровым управлением способствуют минимизации использования материалов, поскольку позволяют индивидуализировать производство структур очень сложной геометрии. Другим инновационным методом серийного производства элементов ТАБ является процесс экструзии, описанный в [13, 14]. Обычно неармированные и армированные микрофиброй бетонные компоненты производятся с помощью процессов экструзии, связанных с аддитивным производством [15–17]. В [18] предложен инновационный процесс, который позволяет интегрировать пропитанный текстиль в экструзию бетона и таким образом производить высокоэффективные композиты с прочностью на разрыв до 4 000 МПа. К реологическим свойствам свежего бетона, полученного в процессе экструзии, предъявляются высокие требования. После выхода из сопла должна быть достигнута достаточно высокая прочность в сыром виде, чтобы сохранить желаемую геометрическую форму [15, 18]. Чтобы решить эту проблему, в [18] была разработана испытательная установка для определения пригодности свежего бетона для процесса экструзии до реального процесса экструзии.

В дополнение к 3D-печати и экструзии бетона для производства бетонных компонентов, адаптированных к нагрузке, основанных на принципе «форма следует за силой», используются и другие методы производства, такие как ламинирование, торкретирование или центрифугирование. Например, в [19] были проведены обширные исследования по складыванию структур ТАБ на основе таких форм, как оригами или йошимура-оригами [20].

3D-печать позволяет размещать материал только в тех зонах, где это необходимо, что минимизирует расход бетона и открывает новые возможности для сложных геометрий. Исследование [21] анализирует этапы производства, процессы и физические основы аддитивного производства с использованием цементных материалов, включая экструзию. В работе [22] представлена концепция CONPrint3D, ориентированная на крупномасштабное строительство с применением монолитной 3D-печати бетона непосредственно на строительной площадке. Обзор [23] акцентирует внимание на развитии технологий экструзии бетона, предлагая дорожную карту для дальнейших исследований и внедрения. Исследование [24] рассматривает аддитивное производство железобетонных элементов, включая использование металлической арматуры, что позволяет улучшить механические свойства печатных конструкций. Наконец, работа [25] посвящена разработке стратегии экспериментальной характеристики механических свойств 3D-печатного бетона, что важно для оценки надежности и долговечности таких материалов. В [13] были исследованы формообразующие свойства экструдируемых полос ТАБ, и удалось добиться радиуса изгиба до 10 см без видимых трещин и дефектов.

Стратегия минимизации материалов направлена на создание более легких конструкций с использованием меньшего количества материала. Соответствующую геометрию, адаптированную к нагрузке, можно найти, например, посредством оптимизации топологии [26, 27] и использования принципа «форма следует за силой» [28, 29]. В этом контексте внутренне разветвленные решетчатые структуры и внутренние узлы, стойки и связи имеют высокий потенциал. В [30] тонкосводчатая бетонная плита была разработана в соответствии с определенной геометрией, которая выдерживала в 2.5 раза большую расчетную нагрузку в более критическом сценарии асимметричной нагрузки.

Объектом нашего исследования являются облегченные консольные покрытия из текстильно-армированного бетона (ТАБ), предметом исследования – технологические и конструктивные особенности проектирования, изготовления и испытаний прототипов консольных конструкций, включая механические свойства, эффективность армирования и устойчивость к нагрузкам.

Цель исследования: разработать, изготовить и экспериментально испытать прототипы облегченных консольных конструкций с текстильным армированием. Основной задачей является под-

тверждение возможности улучшения прочностных характеристик и повышения долговечности за счет использования армирования из стекловолокна.

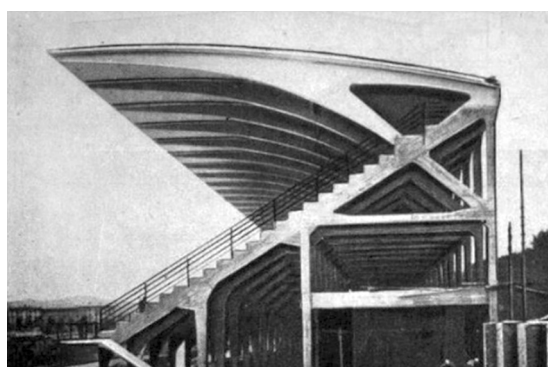
Новизна и актуальность исследования заключаются в предложенном и экспериментально опробованном подходе к созданию прототипов консольных покрытий с применением текстильно-армированного бетона, ранее не применявшегося в таких конструкциях. А также в использовании 3D-печатной опалубки, обеспечивающей высокую точность геометрии и минимизацию отходов, и в демонстрации остаточной прочности текстильно-армированного бетона, что открывает перспективы его применения в конструкциях, работающих в экстремальных условиях (например, в сейсмоактивных регионах).

2. Материалы и методы / Materials and methods

Для исследования возможностей текстильно-армированного бетона в конструкциях покрытий консольного типа проведено инженерное проектирование для разработки прототипа с учетом требований к прочности и легкости, а также лабораторные испытания для оценки механических характеристик прототипа. На текущий момент в открытых источниках отсутствуют исследования, посвященные применению ТАБ для консольных покрытий. Эти методы помогают выявить потенциал применения материала и определить его эффективность в конструкциях покрытий консольного типа. За образец взята конструкция навеса над трибунами стадиона по проекту Пьера Луиджи Нерви (рис. 1). Выбор обусловлен исторической значимостью данного объекта, ставшего новаторским для своего времени. Конструкция была выполнена с использованием армоцемента, который считался передовым решением для изгибаемых бетонных элементов. Однако у армоцементных конструкций есть существенный недостаток: стальная арматура со временем подвергается коррозии без достаточного защитного слоя из бетона, что приводит к разрушению конструкции. Применение текстильного армирования устраняет эту проблему благодаря его коррозионной стойкости, что исключает необходимость увеличивать поперечное сечение для дополнительной защиты. Это делает ТАБ более перспективным решением для долговечных консольных конструкций.

Для исследования применимости ТАБ в конструкциях консольного типа был выбран экспериментальный подход, включающий разработку прототипа, его изготовление и последующее испытание на прочность и устойчивость.

a)



b)



Рис. 1. Консольное покрытие стадиона во Флоренции:
а) на этапе строительства¹; б) современное состояние²
Fig. 1. Florence stadium cantilever roof: a) construction phase¹; b) present condition²

¹ Фото из книги: Иванова Е. К. Пьер Луиджи Нерви. Москва: Стройиздат, 1968. 126 с.

² Фото из открытых источников.

Основным компонентом для изготовления бетона являлся портландцемент марки М400, а также мелкий заполнитель – кварцевый песок с размером фракции 0–0.63 мм. Характеристики составляющих бетонной смеси представлены в таблице 1. Армирующий материал представлен стекловолокном, пропитанным жидким стеклом для повышения сцепления с бетонной матрицей. В качестве добавки использовался суперпластификатор для улучшения технологичности бетонной смеси. В рамках эксперимента использовались стандартный состав для получения бетона класса В20 и армирующая сетка из стекловолокна с оптимальным шагом плетения [1, 2].

Таблица 1. Характеристики составляющих бетонной смеси
Table 1. Properties of concrete mix components

Материал	Характеристика	Значение	Состав (кг/м³)
Цемент	Марка	М400	749
	Класс	ПЦ II/Б-32.5Н	
Крупный заполнитель	Не используется		–
Мелкий заполнитель	Тип	Универсальный кварцевый песок	1 367
	Размер фракции	0–0.63 мм	
	Насыпная плотность	1 450 кг/м³	
Вода	Качество	Средней жесткости, с низким содержанием хлоридов и сульфатов, а также нейтральным pH	276
Добавки	Тип	Суперпластификатор	15
	Плотность	1.15 мг/л	
	pH	4.0–6.0	

Была подготовлена песчано-цементная смесь, в которой не используется щебень. Это обосновывается необходимостью адаптировать состав бетона к конкретным условиям и требованиям конструкции. Смесь бетона готовилась с помощью механического смесителя. В процессе заливки смесь вибрировалась на вибростоле для удаления воздушных пузырей и обеспечения плотного заполнения формы. Для определения прочностных характеристик полученной бетонной смеси были изготовлены четыре куба размером 10×10×10 см. Полученное значение сопротивления бетона при осевом сжатии составило 16.2 ± 0.4 Па, что соответствует призмочной прочности заданного класса бетона – В20.

На рис. 2 представлена армирующая сетка, используемая в данном исследовании. Характеристики исследуемых образцов представлены в таблице 2. Оптимальный шаг плетения сетки из стекловолокна выбран на основе данных испытаний, проводившихся предыдущими исследователями [1, 2].

Для создания опалубки использовался 3D-принтер модели Raise3D Pro2 Plus с рабочей областью 305×305×605 мм, который позволил напечатать форму для бетонных образцов с толщиной стенок 1.2 мм. Процесс печати проводился при температуре 215 °С.

Испытания проводились на универсальной измерительной установке Instron 5965 с использованием специально изготовленной оснастки для фиксации прототипа конструкции. Измерение вертикальных перемещений производилось с помощью циферблатных индикаторов.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Конструирование прототипа

На основании вышеуказанных граничных условий была разработана 3D-модель конструкции опалубки (рис. 3). Изготовление опалубки предполагало создание образца сложной, но монолитной формы, что являлось ключевым условием для устранения возможных проблем с герметичностью стыков составных элементов. Основной контур модели повторяет сложное поперечное сечение консольных балок, а пространство между тремя балками формируется за счет двух вставных элементов.

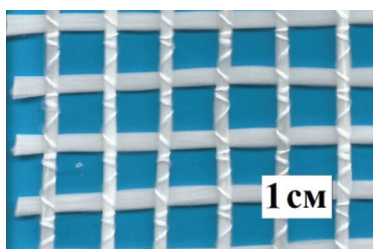


Рис. 2. Гибридная сетка из щелочестойких стеклянных ровингов (фото авторов)
Fig. 2. Hybrid alkali-resistant glass roving mesh (authors' photo)

В реальности консольное покрытие – это составная конструкция, соединения которой обеспечивают совместную работу всех элементов. Вследствие малых размеров прототипа было принято решение об изготовлении монолитного образца без необходимости обеспечения дополнительных связей для обеспечения условий работы, приближенных к реальным.

Опалубка для бетонирования была изготовлена из PLA-пластика методом 3D-печати. Размеры прототипа были выбраны на основе расчетных данных, учитывающих минимальные требования к толщине бетонного слоя и армированию. Толщина консоли составила 10 мм, что соответствовало масштабу реальной конструкции. Общая длина консоли составляла 650 мм, при этом она опиралась на три консоли с общей шириной покрытия 160 мм. Размер определялся по доступной области печати 3D-принтера (300 × 300 мм), поскольку планировалось печатать цельную опалубку без стыков и швов. Также на основании предыдущих исследований [2, 4] учитывалась минимальная толщина рабочего слоя бетона при армировании в одну нить – 10 мм. Длина консоли уместилась в поле печати в масштабе 1:30. Соответственно, толщина покрытия 10 мм и равное ей сечение консольной балки реальной конструкции в самом тонком месте на конце – 10 × 10 мм. Пропорции конструкции соблюдены в соответствии с оригинальными чертежами консоли. Для испытания были изготовлены два пролета покрытия протяженностью по 65 мм, опирающихся на три консоли. Общая ширина 160 мм. На рис. 4а показан процесс изготовления опалубки на 3D-принтере Raise3D Pro2 Plus с областью печати одним экструдером на столе размером 305 × 305 × 605 мм. Материал – пластик PLA, толщина стенок 1.2 мм без заполнения. Пара дополнительных формирующих вставок были выполнены с 10%-м заполнением. Температура печати 215 °С при температуре стола 70 °С (80 °С – при печати первого слоя) (рис. 4б).

Процесс бетонирования

Бетонная смесь была приготовлена по пропорциям таблицы 1. После приготовления смесь заливалась в опалубку и подвергалась виброобработке для устранения воздушных пустот и уплотнения материала. Образцы хранились в лаборатории при температуре 20 ± 2 °С и влажности 50 ± 5 % на протяжении 28 суток до проведения испытаний.

Таблица 2. Характеристики текстильного армирования
Table 2. Characteristics of textile reinforcement

Армирование	Щелочестойкая стеклосетка
Предел прочности на растяжение, МПа	1 010 МПа
Модуль упругости, ГПа	65 ГПа

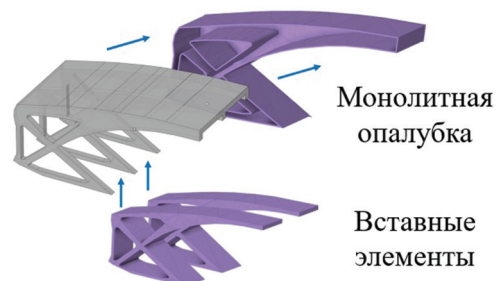


Рис. 3. Схема формирования конструкции (составлена авторами)
Fig. 3. Construction scheme (authors' illustration)

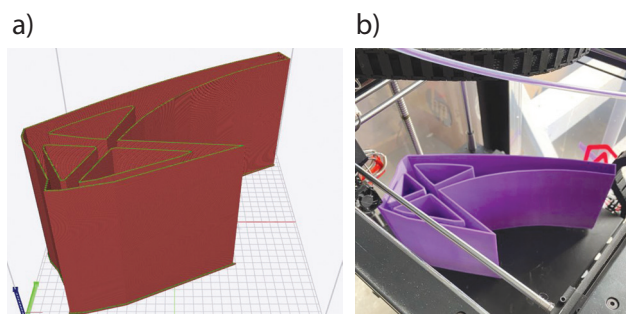


Рис. 4. Изготовление опалубки: а) 3D-модель; б) печать на 3D-принтере (модель и фото авторов)
Fig. 4. Formwork fabrication: а) 3D-model; б) 3D printing (model and photo by authors)

Для сохранения пространства между нитями и предотвращения деформации в процессе бетонирования текстильных арматурных нитей осуществлялась процедура пропитки их жидким стеклом и последующее выдерживание в течение 24 часов. Этот процесс обеспечивает необходимое сцепление между арматурой и материалом.

Как было сказано выше, процесс укладки бетона был запланирован таким образом, чтобы консоли и покрытие располагались боком, так, чтобы дно опалубки находилось внизу (рис. 5a). После установки армирующей сетки первый слой бетона толщиной 10 мм укладывался для формирования первой консоли и ее соединения с покрытием. Далее устанавливался первый вставной элемент высотой 65 мм и укладывался бетон для формирования пространства покрытия между консольными балками (рис. 5b). Аналогичные шаги повторялись для центральной консоли с толщиной слоя 10 мм и второго промежутка между балками шириной 65 мм. На заключительном этапе происходила укладка бетона третьей консоли – 10 мм. Таким образом заполнялась вся опалубка для формирования конструкции с расстоянием между боковыми поверхностями консолей в 160 мм. С целью предотвращения деформации опалубки внутренние полости последней были заполнены песком, а также применены струбцины (рис. 5c). Армирование прототипа минимально допустимой толщины осуществлялось вдоль центральной оси для соблюдения условий совместной работы бетона и арматуры. В реальных условиях арматура закладывается вдоль верхнего бетонного слоя конструкции консоли, поскольку именно там возникают растягивающие усилия.

На рис. 6 показаны опытные прототипы изготовленных конструкций.

Испытание опытного образца

Прототипы были подвергнуты испытаниям на универсальной испытательной машине Instron 5965 (производитель – Instron, Великобритания) с целью определения предела прочности на изгиб и устойчивости к нагрузкам. Нагрузка прикладывалась равномерно до разрушения образца, при этом использовалась пластина для равномерного распределения силы. Измерение деформаций осуществлялось с использованием циферблатных индикаторов, установленных на консольных элементах.

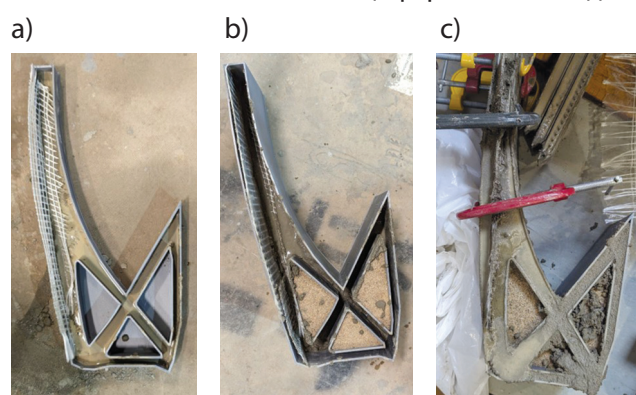


Рис. 5. Изготовление прототипа:

а) укладка бетона первого слоя – консоли и расположение армирования; б) заполнение пустот песком для повышения прочности внутренних стенок опалубки; в) фиксация внешних стенок опалубки после укладки смеси при помощи зажимов (фото авторов)

Fig. 5. Prototype fabrication: a) concrete placement of the first layer – cantilevers and reinforcement layout; b) filling voids with sand to enhance the strength of the formwork's inner walls; c) securing the formwork's outer walls after concrete placement using clamps (authors' photo)

Стандартные конструкции кровли подвергаются постоянной равномерно распределенной нагрузке от собственного веса и временной снеговой нагрузке. При расчетах данная нагрузка замещается эквивалентной распределенной нагрузкой. Очевидно, при использовании консольного покрытия наиболее критическим является случай приложения нагрузки на конец консоли.

При испытаниях нагрузка шла на конец консоли через пластину с целью исключения влияния локальных эффектов (рис. 7a). Реальные опоры, представленные стойками и креплениями трибун, были закреплены. Жесткость опоры обеспечивалась специально разработанным винтовым зажимом, который надежно фиксировал конструкцию. Схема функционирования исходной конструкции предполагала действие растягивающих сил на покрытие и заднюю стенку. Процесс испытания образцов с образованием первых трещин (рис. 7b) и внешним видом образцов (рис. 7c и 7d) представлены ниже.

В результате проведенных испытаний были получены данные о прочностных характеристиках текстильно-армированного бетона в конструкциях консольного типа: данные о деформации перемещения свободного края консоли под действием вертикальной нагрузки. Основное внимание уделялось пределу прочности при изгибе и устойчивости конструкции под нагрузкой. Результаты испытаний на изгиб представлены на рис. 8 в виде кривых нагрузка – вертикальное перемещение.

Прототип конструкции был подвергнут равномерной нагрузке на конце консоли, что позволило оценить его способность выдерживать распределенные силы. Максимальная сила разрушения составила около 400 Н, что соответствует напряжению в 4.08 МПа. При этом разрушение произошло в предполагаемом критическом сечении. Полученные значения превышают нормативные показатели для бетона класса В20 в 1.9–2.4 раза. Это указывает на эффективность конструкции, что соответствует результатам предыдущих исследований [1, 3, 4].

Интересным наблюдением стало восстановление несущей способности конструкции после первичного разрушения. Несмотря на разрушение бетонной матрицы, текстильное армирование продолжило удерживать конструкцию, предотвращая ее полное разрушение. Это говорит о высоком уровне остаточной прочности, что делает такие конструкции особенно перспективными для использования в условиях экстремальных нагрузок, например, в сейсмически активных регионах.

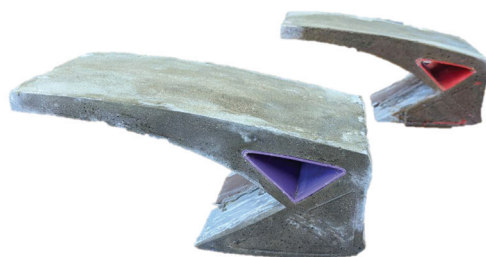


Рис. 6. Образцы конструкции без внешней опалубки через 28 суток (фото авторов)

Fig. 6. Concrete specimens without external formwork after 28 days (authors' photo)

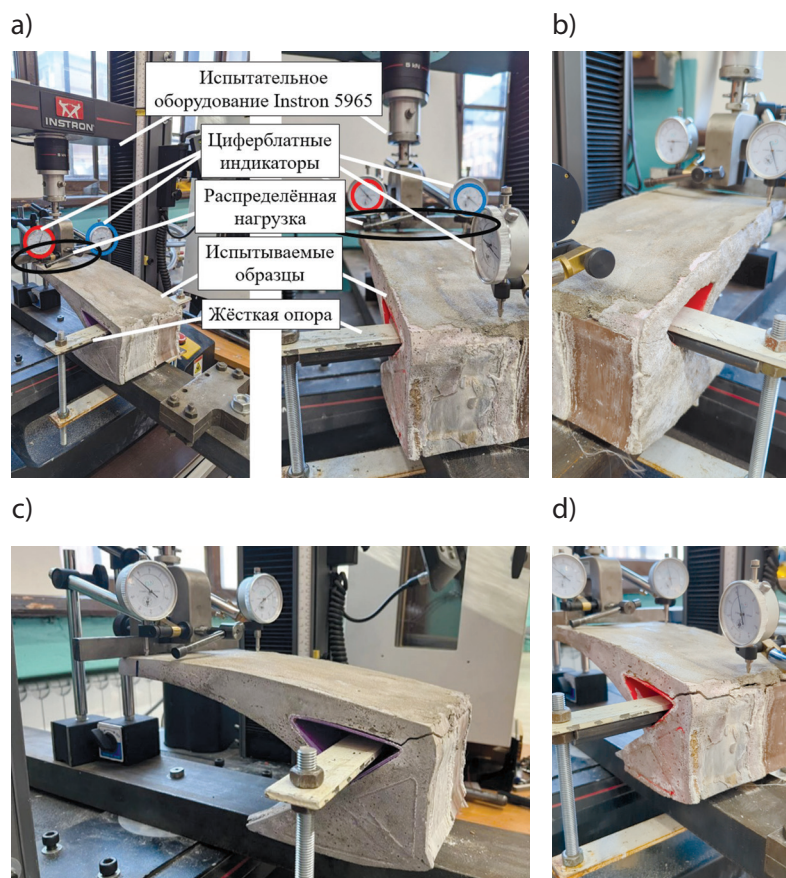


Рис. 7. Испытания образцов на установке Instron 5965 с использованием дополнительной балки, служащей опорой для базы консольной конструкции: а) общий вид; б) образование первой трещины во время испытания образца № 2; с, d) внешний вид образцов № 1 и № 2 соответственно по окончании испытания (фото авторов)

Fig. 7. Specimen testing on Instron 5965 with additional support beam for cantilever base: a) general view; b) first crack formation during test of specimen; c, d) post-test appearance of specimens 1 and 2 (authors' photos)

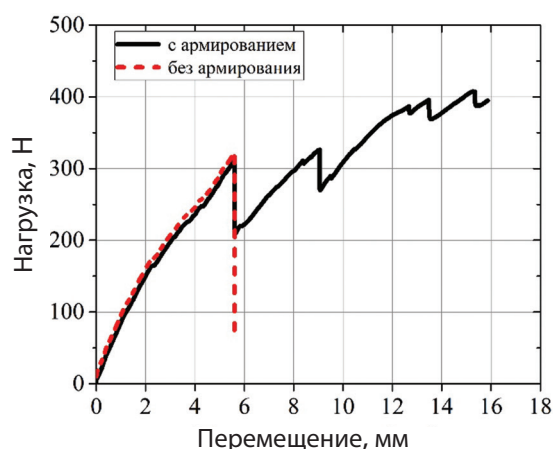


Рис. 8. Зависимость нагрузки от вертикального перемещения армированной конструкции по сравнению с контрольной конструкцией (график составлен авторами)

Fig. 8. Load vs. vertical displacement of reinforced construction compared to control structure (authors' graph)

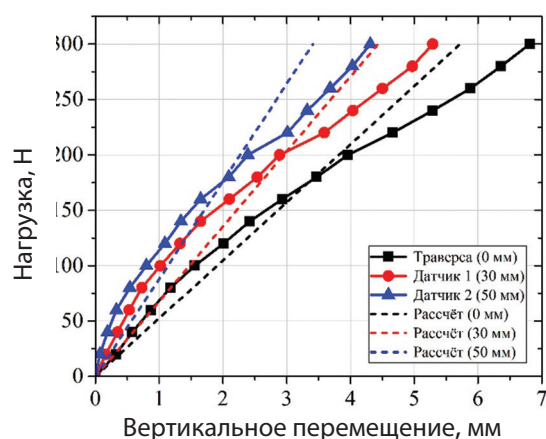


Рис. 9. Зависимость вертикальной силы от перемещения края консоли: перемещение, фиксируемое первым циферблатным индикатором (красный цвет); перемещение, фиксируемое вторым индикатором (синий цвет), перемещение траверсы, передающей распределенную нагрузку (черный цвет) (график составлен авторами)

Fig. 9. Vertical force vs. cantilever edge displacement: displacement measured by dial indicator 1 (red); displacement measured by dial indicator 2 (blue); displacement of load transfer traverse (black) (authors' graph)

Для материалов использовался бетон с модулем упругости 19.4 ГПа и коэффициентом Пуассона 0.141. Конструкция была жестко закреплена по границе основания, а на верхний край поверхности консоли было приложено равномерное линейно-распределенное усилие 400 Н. Результаты расчета нанесены в виде штриховых линий на рис. 9.

Полученные результаты показывают аналогичную эффективность по сравнению с армированием балок, где прирост прочности может достигать 40–85 % [4]. Однако внутренняя текстильная арматура обеспечивает значительное повышение остаточной прочности, что является ее основным преимуществом. Это подтверждает необходимость дальнейших исследований для определения параметров армирования и более эффективного распределения нагрузок в консольных конструкциях.

На основании полученных данных необходимо проведение дальнейших испытаний с целью оптимизации толщины бетонного слоя и увеличения количества армирующих элементов. Это позволит улучшить прочностные характеристики конструкции.

На рис. 9 и 10 представлены графики на основе усредненных экспериментальных данных взаимосвязи прикладываемой нагрузки от фиксируемого вертикального перемещения точек на поверхности конструкции консольного покрытия.

На рис. 10 отображено вертикальное перемещение точек консоли при различной вертикальной нагрузке в зависимости от расстояния от края консоли. В качестве индикаторов взяты точки на краю консоли, а также на расстоянии 30 и 50 мм от края. Предельный допустимый прогиб консоли 2L/120 при длине выноса консоли $L = 332$ мм, черный пунктир по горизонтали соответствует перемещению края консоли на 5.53 мм.

Конечно-элементное моделирование

Конечно-элементный расчет конструкции был выполнен с целью определения напряженно-деформированного состояния под воздействием внешней нагрузки. Модель была создана на основе исходной геометрии конструкции, с использованием тетраэдрических конечных элементов. Средний размер элемента составил 10 мм с более детализированной сеткой (до 2 мм) в местах концентрации нагрузок.

График на рис. 9 показывает нормальную работу конструкций до нагрузки в 300 Н. После этого значения у половины образцов начинали возникать трещины и дальнейшее сравнение с оставшимися целыми образцами не релевантно. При этом близость расчетных данных, отображенных в виде пунктирных линий, и результатов эксперимента показывает верность используемой при расчетах конечноэлементной модели (рис. 11). На рис. 10 продемонстрированы перемещения свободного конца консоли под действием меняющейся с шагом 40 Н вертикальной нагрузки. Из графика следует, что достижение эстетико-психологической границы предельной деформации в 5.53 мм, отражающей предельное состояние второй группы, происходит при нагрузке приблизительно в 260 Н. Это в свою очередь меньше нагрузки в 300 Н, при которой сохраняется нормальная работа, и нагрузки в 400 Н, при которой происходит разрушение. Таким образом, данные эксперимента отображают наличие запаса прочности, который может стать решающим фактором при использовании подобных конструкций в экстремальных условиях.

4. Заключение / Conclusions

1. Проведенные испытания текстильно-армированного бетона для консольных покрытий показали, что максимальная сила разрушения составила около 400 Н, что соответствует напряжению в 4.08 МПа. Это превышает нормативные показатели для бетона класса В20 в 1.9–2.4 раза, что подтверждает высокую эффективность ТАБ в конструкциях консольного типа.
2. Несмотря на разрушение бетонной матрицы, текстильное армирование продолжало удерживать конструкцию, предотвращая ее полное разрушение. Это демонстрирует высокую остаточную прочность, что делает такие конструкции перспективными для применения в экстремальных условиях, например, в сейсмоактивных регионах.
3. При сравнении с традиционными методами армирования ТАБ показал прирост прочности на 40–85 %, что подтверждает эффективность использования текстильного армирования для повышения прочностных характеристик. Однако для более оптимизированных результатов требуется дальнейшая работа по уточнению параметров армирования.

Для достижения еще более высоких показателей прочности и долговечности рекомендуется провести дополнительные исследования, направленные на оптимизацию толщины бетонного слоя, количества армирующих элементов и шага сетки. В частности, следует проверить возможность уменьшения защитного слоя, что может повлиять на снижение веса конструкции и улучшение экономических показателей.

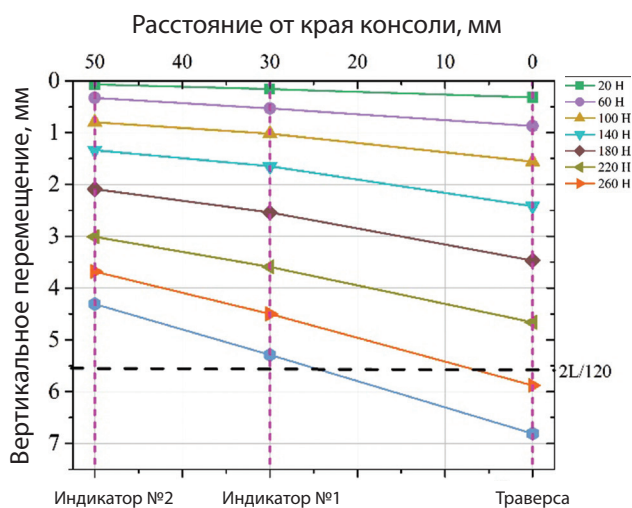


Рис. 10. Зависимость вертикального перемещения точек консоли для различной вертикальной нагрузки (график составлен авторами)

Fig. 10. Vertical displacement of cantilever points vs. vertical load (authors' graph)

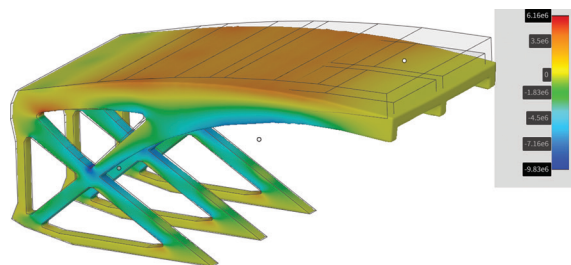


Рис. 11. Конечно-элементное моделирование. Отображаются изополя растягивающих напряжений (модель авторов)

Fig. 11. Finite element modeling. Tensile stress contours shown (authors' model)

Полученные результаты свидетельствуют о высоком потенциале текстильно-армированного бетона для применения в строительных конструкциях, где важны легкость, долговечность и устойчивость к нагрузкам, а также в экстремальных эксплуатационных условиях, таких как сейсмоактивные регионы.



Вклад авторов. Борисов Н. О.: разработал и провел все основные экспериментальные испытания, выполнил необходимые расчеты, включая конечно-элементное моделирование, а также анализировал полученные данные. Ответственный за инженерное проектирование и изготовление прототипов, выбор компонентов для бетонной смеси и разработку методики испытаний. Столяров О. Н.: принимал участие в подготовке экспериментальных данных, участвовал в анализе механических свойств исследуемых конструкций и подготовке графиков для дальнейшего исследования.

Author contributions. Nikita O. Borisov: designed and conducted all major experimental tests, performed necessary calculations, including finite element modeling, and analyzed the resulting data. Responsible for the engineering design and prototype fabrication, selection of concrete mix components, and development of the testing methodology. Oleg N. Stolyarov: participated in the preparation of experimental data, assisted in the analysis of the mechanical properties of the studied structures, and helped prepare graphs for further investigation.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список литературы / References

1. Kirsanov A. I., Stolyarov O. N. Mechanical properties of synthetic fibers applied to concrete reinforcement. *Magazine of Civil Engineering*. 2018;(4):15–23. <https://doi.org/10.18720/MCE.80.2>
2. Haas R., Quadflieg T., Stolyarov O. Analysis of reinforcement efficiency and microscopic characterization of glass and carbon roving geometry in prestressed concrete composites. *Journal of Composite Materials*. 2021;55(23):3293–3305. <https://doi.org/10.1177/00219983211013382>
3. Stolyarov O., Quadflieg T., Gries T. Characterization of shear behavior of warp-knitted fabrics applied to composite reinforcement. *The Journal of the Textile Institute*. 2017;108(1):89–94. <https://doi.org/10.1080/00405000.2016.1153876>
4. Quadflieg T., Stolyarov O., Gries T. Influence of the fabric construction parameters and roving type on the tensile property retention of high-performance rovings in warp-knitted reinforced fabrics and cement-based composites. *Journal of Industrial Textiles*. 2017;47(4):453–471. <https://doi.org/10.1177/1528083716652831>
5. Lu W., Lee W. M. W., Xue F., Xu J. Revisiting the effects of prefabrication on construction waste minimization: a quantitative study using bigger data. *Resources, Conservation and Recycling*. 2021;170:105579. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105579>
6. Beckmann B., Bielak J., Bosbach S., Scheerer S., Schmidt Ch., Hegger J., Curbach M. Collaborative research on carbon reinforced concrete structures in the CRC/TRR 280 project. *Civil Engineering Design*. 2021;3(3):99–109. <https://doi.org/10.1002/cend.202100017>
7. Janani R., Lalithambigai N. A critical literature review on minimization of material wastes in construction projects. *Materials Today: Proceedings*. 2021;37(2):3061–3065. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.011>
8. Kortmann J. *Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton = Process engineering investigations into the recyclability of carbon concrete*. Springer Vieweg Wiesbaden; 2020. 249 p. (In Germ.) URL: <https://www.sci-hub.ru/10.1007/978-3-658-30125-5>. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-30125-5>
9. Rempel S., Will N., Hegger J., Beul P. Filigrane Bauwerke aus Textilbeton = Filigree structures made of textile-reinforced concrete. *Beton- und Stahlbetonbau = Concrete and reinforced concrete construction*. 2015;110(S1):83–93. (In Germ.) <http://dx.doi.org/10.1002/best.201400111>
10. Bielak J., Schöneberg J., Classen M., Hegger J. Shear capacity of continuous concrete slabs with CFRP reinforcement. *Construction and Building Materials*. 2022;320:126117. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126117>
11. Zhang M., Deng M. Tensile behavior of textile-reinforced composites made of highly ductile fiber-reinforced concrete and carbon textiles. *Journal of Building Engineering*. 2022;57:104824. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104824>
12. Stark A., Classen M., Hegger J. Bond behaviour of CFRP tendons in UHPFRC. *Engineering Structures*. 2019;178(7):148–161. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.10.002>
13. Kalthoff M., Raupach M., Matschei T. Extrusion and subsequent transformation of textile-reinforced mortar components – requirements on the textile, mortar and process parameters with a laboratory mortar extruder (LabMorTex). *Buildings*. 2022;12(6):726. <https://doi.org/10.3390/buildings12060726>
14. Kalthoff M., Raupach M., Matschei T. Investigation into the integration of impregnated glass and carbon textiles in a laboratory mortar extruder (LabMorTex). *Materials*. 2021;14(23):7406. <https://doi.org/10.3390/ma14237406>

15. Alfani R., Guerrini G. L. Rheological test methods for the characterization of extrudable cement-based materials – A review. *Materials and Structures*. 2005;38(2):239–247. <https://doi.org/10.1007/bf02479349>
16. Perrot A., Rangeard D., Nerella V. N., Mechtcherine V. Extrusion of cement-based materials – An overview. *RILEM Technical Letters*. 2018;3:91–97. <http://dx.doi.org/10.21809/rilemtechlett.2018.75>
17. Li Z., Zhou X. Manufacturing cement-based materials and building products via extrusion: from laboratory to factory. *ICE Proceedings Civil Engineering*. 2015;168(6):11–16. <http://dx.doi.org/10.1680/cien.14.00065>
18. Kalthoff M., Raupach M., Matschei T. Investigation of rheological test methods for the suitability of mortars for manufacturing of textile-reinforced concrete using a laboratory mortar extruder (LabMorTex). *Construction Materials*. 2022;2(4):217–233. <https://doi.org/10.3390/constrmater2040015>
19. Du W., Liu Q., Zhou Z., Uddin N. Experimental investigation of innovative composite folded thin cylindrical concrete shell structures. *Thin-Walled Structures*. 2019;137:224–230. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.01.014>
20. Chudoba R., van der Woerd J., Schmerl M., Hegger J. ORICRETE: Modeling support for design and manufacturing of folded concrete structures. *Advances in Engineering Software*. 2014;72:119–127. <https://doi.org/10.1016/j.advengsoft.2013.05.004>
21. Mechtcherine V., Bos F. P., Perrot A., Leal da Silva W. R., Nerella V. N., Fataei S. et al. Extrusion-based additive manufacturing with cement-based materials – Production steps, processes, and their underlying physics: A review. *Cement and Concrete Research*. 2020;132:106037. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106037>
22. Mechtcherine V., Nerella V. N., Will F., Näther M., Otto J., Krause M. Large-scale digital concrete construction – CONPrint3D concept for on-site, monolithic 3D-printing. *Automation in Construction*. 2019;107(3):102933. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.102933>
23. Buswell R. A., Leal de Silva W. R., Jones S. Z., Dirrenberger J. 3D printing using concrete extrusion: A roadmap for research. *Cement and Concrete Research*. 2018;112:37–49. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.006>
24. Classen M., Ungermann J., Sharma R. Additive manufacturing of reinforced concrete – Development of a 3D printing technology for cementitious composites with metallic reinforcement. *Applied Sciences*. 2020;10(11):3791. <https://doi.org/10.3390/app10113791>
25. Meurer M., Classen M. Mechanical properties of hardened 3D printed concretes and mortars-development of a consistent experimental characterization strategy. *Materials*. 2021;14(4):752. <https://doi.org/10.3390/ma14040752>
26. Lewis W. J. Chapter 6. Tension cables in suspension bridges. A case of form-finding. In: *Tension Structures*. 2nd edition. ICE Publishing; 2017. P. 101–133. <https://doi.org/10.1680/tsfab.61736.101>
27. Smarslik M., Ahrens M. A., Mark P. Toward holistic tension- or compression-biased structural designs using topology optimization. *Engineering Structures*. 2019;199(8):109632. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109632>
28. Stark A., Classen M., Knorrek C., Camps B., Hegger J. Sandwich panels with folded plate and doubly curved UHPFRC facings. *Structural Concrete*. 2018;19(6):1851–1861. <http://dx.doi.org/10.1002/suco.201700288>
29. Hegger J., Herbrand M., Stark A., Classen M. Betonbau der Zukunft: leicht, filigran und nachhaltig/The future of structural concrete: light, filigree and sustainable. *Bauingenieur = Civil Engineer*. 2015;90(07-08):337–344. (In Germ.) <http://dx.doi.org/10.37544/0005-6650-2015-07-08-61>
30. Liew A., López D. L., Van Mele T., Block Ph. Design, fabrication and testing of a prototype, thin-vaulted, unreinforced concrete floor. *Engineering Structures*. 2017;137:323–335. <http://dx.doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.01.075>



Информация об авторах

Борисов Никита Олегович, аспирант, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, borisov.n@edu.spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Столяров Олег Николаевич, д-р техн. наук, доцент ВШГиЭ, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Российская Федерация, stolyarov_on@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

Information about the authors

Nikita O. Borisov, Postgraduate, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, borisov.n@edu.spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7769-4931>

Oleg N. Stolyarov, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Higher School of Hydraulic and Power Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Saint Petersburg, Russian Federation, stolyarov_on@spbstu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2930-5022>

Получена 09 декабря 2024 г., одобрена 01 февраля 2025 г., принята к публикации 14 февраля 2025 г.
Received 09 December 2024, Approved 01 February 2025, Accepted for publication 14 February 2025



Свободные колебания тонкостенных магистральных нефтепроводов большого диаметра с учетом влияния продольной силы и массы протекающей жидкости

С. И. Волынец ✉

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

✉ volynec-s@bk.ru



Аннотация. Исследуются свободные колебания тонкостенных магистральных нефтепроводов большого диаметра с учетом влияния продольной силы и массы протекающей жидкости, подтверждается их критичное влияние на надежность конструкции, а значит, необходимость учета в расчете. Численный анализ проведен на основе полубезмоментной теории оболочек с учетом внутреннего давления, толщины защитного железобетонного слоя, коэффициента постели грунта и действующей продольной силы. Результаты показали, что при транспортировке нефти собственные частоты колебаний трубопровода снижаются быстрее, чем при транспортировке газа, а увеличение толщины железобетонной рубашки и внутреннего рабочего давления повышает частоты и общую жесткость системы. Коэффициент постели грунта также играет существенную роль, компенсируя часть нагрузок и увеличивая частоты колебаний. В ходе исследования было подтверждено, что наибольшее влияние на динамические характеристики трубопровода оказывает продольная сила, приводящая к заметному снижению частот свободных колебаний. Полученные выводы и закономерности целесообразно использовать при проектировании и эксплуатации крупных нефтепроводов в неоднородных грунтах, чтобы обеспечить требуемую устойчивость и минимизировать риск резонансных явлений.

Ключевые слова: тонкостенная оболочка, полубезмоментная теория, расчет нефтепровода, продольная сила, неоднородная оболочка

Благодарности. Статья подготовлена в рамках реализации государственного задания в сфере науки на выполнение научных проектов, реализуемых коллективами образовательных организаций высшего образования, подведомственных Минобрнауки России по проекту «Компьютерное моделирование механических, температурных и динамических процессов в слабых и многолетнемерзлых грунтах для обеспечения надежности грунтовых оснований инженерных сооружений» (№ FEWN-2024-0006).

Для цитирования: Волынец С. И. Свободные колебания тонкостенных магистральных нефтепроводов большого диаметра с учетом влияния продольной силы и массы протекающей жидкости. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):93–101 <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-93-101> EDN: MQOHFB

Free vibration of large-diameter, thin-walled oil pipelines considering the influence of longitudinal force and mass of flowing liquid

Sviatoslav I. Volynets ✉

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

✉ volynec-s@bk.ru



Abstract. This study examines the free vibrations of thin-walled, large-diameter oil pipelines, considering the influence of longitudinal force and the mass of flowing liquid. It confirms that these factors critically affect the structural reliability of the pipelines and therefore must be included in calculations. The numerical analysis was based on the semi-instantaneous shell theory, accounting for internal pressure, the thickness of the protective reinforced concrete layer, the soil's spring constant, and the applied longitudinal force. The results showed that, during oil transport, the natural vibration frequencies of the pipeline decrease more rapidly than during gas transport. Increasing the thickness of the reinforced concrete shell and the internal operating pressure increases the frequencies and the overall stiffness of the system. The soil's spring constant also plays a significant role by offsetting some of the loads and increasing the vibration frequencies. The study confirmed that the longitudinal force has the greatest influence on the dynamic characteristics of the pipeline, leading to a significant decrease in the free vibration frequencies. The findings and established relationships should be used in the design and operation of large oil pipelines in heterogeneous soils to ensure the required stability and minimize the risk of resonance.

Keywords: thin-walled shell, semi-instantaneous theory, calculation of the oil pipeline, longitudinal force, inhomogeneous shell

Acknowledgements. This work was prepared as part of a state assignment for scientific projects carried out by research teams at higher education institutions under the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation; project No. FEWN-2024-0006 "Computer modeling of mechanical, thermal, and dynamic processes in weak and permafrost soils to ensure the reliability of soil foundations for engineering structures".

For citation: Volynets S. I. Free vibration of large-diameter, thin-walled oil pipelines considering the influence of longitudinal force and mass of flowing liquid. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):93–101. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-93-101>



1. Введение / Introduction

В связи с необходимостью транспортировки нефти и газа на Восток перед нефтегазовой отраслью России стоит непростая задача проложить тысячи километров магистральных трубопроводов в различных геологических и климатических условиях. Опыт прошлых лет показывает, что вместе с увеличением количества труб также увеличивается их диаметр с целью повышения эффективности труб. Так, за последние 50 лет диаметр трубопровода увеличился в среднем с 200 до 1 400 мм, тенденция к дальнейшему увеличению сохраняется. Магистральный трубопровод является стратегически важным объектом, обеспечение надежности которого является приоритетной задачей. Это требует на этапе проектирования решения ряда задач устойчивости, надежности и прочности, особенно если прокладка предполагается в районах с обводненными и слабонесущими грунтами, в которых существует риск всплытия, что может привести к явлению, известному как арочный выброс [1]. Для снижения вероятности выхода трубы из проектного положения из-за всплытия или арочного выброса используется покрытие из особо тяжелого железобетона.

Железобетонная рубашка выполняет функцию пригруза, а также решает проблему механических повреждений при монтаже и эксплуатации нефтепровода. Однако ее использование до конца не изучено, на данный момент не существует нормативных документов, регламентирующих ее толщину. Прокладка трубы в различных геологических условиях накладывает ряд дополнительных ограничений, следовательно, необходимо учитывать влияние внутреннего рабочего давления, активного внешнего давления среды, а также пассивного внешнего действия среды, препятствующего деформации поперечного сечения [2], что классический расчет трубопровода как стержня не учитывает. Необходимо отметить, что тонкостенность конструкции – это параметр, определяющийся отношением фактической толщины стенки трубы к ее диаметру [2], в связи с чем труба считается тонкостенной несмотря на существенный слой железобетона: по общепринятой классификации, отношение

$h/R < 1/12$ позволяет считать трубу оболочкой [3]. Общепринятый подход был описан отечественными [3–6] и зарубежными [7–12] исследователями. Подход, основанный на теории стержней, позволяет получить аналитические выражения для определения частот свободных колебаний трубы в зависимости от физико-механических свойств и скорости движения жидкости, однако не позволяет учесть эффект Кармена, возникающий при повышении диаметра трубопровода. Этих ограничений можно избежать, если рассчитывать трубопровод как тонкостенную оболочку [13].

Цель настоящего исследования – провести комплексное численное моделирование, направленное на изучение влияния продольной силы и связанных факторов на динамическое поведение неоднородных тонкостенных трубопроводов большого диаметра, транспортирующих жидкость (нефть) с учетом влияния грунта при траншейной прокладке. В рамках исследования необходимо учитывать такие параметры, как внутреннее рабочее давление, толщину железобетонной рубашки, коэффициент постели грунта, геометрические характеристики трубы и физические характеристики материала трубы.

Основной задачей являлось выявление закономерностей изменения частот собственных колебаний трубопроводов в зависимости от перечисленных факторов, а также уточнение условий, при которых влияние продольной силы и протекающей жидкости становится критическим. Это позволит обеспечить надежность и устойчивость неоднородных магистральных нефтепроводов в различных геологических и эксплуатационных условиях, а также разработать рекомендации по оптимальному проектированию конструкций и материалов для минимизации рисков механических повреждений и потери устойчивости.

Объектом исследования в настоящей статье являлся тонкостенный нефтепровод с протекающей жидкостью при траншейной прокладке. Это основная исследуемая физическая система, которая включает конструкцию трубопровода, его материал, геометрические характеристики и условия прокладки (в траншее), то есть рассматриваются все характеристики и аспекты нефтепровода, которые могут влиять на его поведение.

Предмет исследования – учет продольной силы при расчете свободных колебаний. Это конкретный аспект исследования, на который направлен анализ. Исследовалось воздействие продольной силы на динамическое поведение (частоты и формы свободных колебаний) нефтепровода.

2. Материалы и методы / Materials and methods

В работе [14] были получены разрешающие уравнения и произведен численный эксперимент, подтверждающий, что на работу трубопровода большого диаметра влияют внутреннее рабочее давление, толщина слоя железобетонной рубашки, длина участка, коэффициент постели, параметр тонкостенности, продольная сила. Работа [15] позволяет в полной мере рассмотреть влияние перечисленных

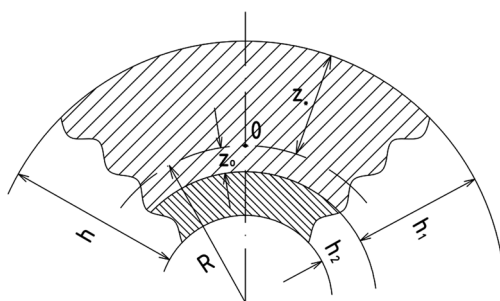


Рис. 1. Расчетная модель неоднородного нефтепровода (рисунок автора)
Fig. 1. Calculation model of heterogeneous oil pipeline (author's illustration)

факторов на работу нефтепровода. Однако наравне с газом транспортируется и нефть, которая, в отличие от газа, способна в большей степени влиять на работу трубы из-за большей массы транспортируемого груза. Настоящее исследование направлено на изучение влияния протекающей жидкости (на примере нефти) на работу нефтепровода. В качестве расчетной модели принята замкнутая неоднородная цилиндрическая оболочка конечной длины L , радиусом R , состоящая из внутреннего стального слоя толщиной h_2 и внешнего слоя из особо тяжелого железобетона h_1 (рис 1.)

Для определения действующего на стенку трубопровода гидростатического давления, появляющегося из-за потока жидкости, протекающей со скоростью V , используется решение, полученное М. А. Ильгамовым и А. С. Вольмиром [16]:

$$q_{ж} = \rho_0 \Phi_{mn} \frac{R_0}{Eh} \left(R_0^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + V^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial \xi^2} \right), \quad (1)$$

где ρ_0 – плотность жидкости;

Φ_{mn} – параметр, зависящий от волновых чисел;

V – скорость потока;

R_0 – исходный радиус трубопровода;

произведение $\rho_0 \Phi_{mn}$ – присоединенная масса жидкости.

Уравнение движения элемента исходной поверхности трубы в усилиях, полученное в [2], с учетом влияния протекающей жидкости будет иметь вид:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^2 T_1}{\partial \xi^2} + \frac{\partial}{\partial \xi} \left(r \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{1}{R_2^*} \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{R_2^*}{R^2} \frac{\partial M_2}{\partial \theta} \right) - \\ & - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{R_2^*}{R_1^*} T_1 \right) + \frac{\partial}{\partial \xi} (RX_1) - \frac{\partial}{\partial \theta} (RX_2) - \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} (R_2^* X_3) = 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Учет жидкости происходит в X_3 :

$$X_3 = -Rhp \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + p_0 - kRw(0.5 - \alpha_1 \cos \theta - \alpha_2 \cos 3\theta) - q_{ж}. \quad (3)$$

С использованием допущений полубезмоментной теории оболочек, решая уравнение (2), после преобразования получаем дифференциальное уравнение движения нефтепровода в перемещениях:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial^3 u}{\partial \xi^3} + \eta h_v^2 \left(\frac{\partial^3}{\partial \theta^3} \right) \left[g_2 + \frac{\partial^2 g_2}{\partial \theta^2} \right] + 2 \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \xi^2} \varepsilon_0 \right) - \frac{P_0 R}{E_0 h} p_0 \frac{\partial^3 g_2}{\partial \theta^3} + \frac{0.5KR^2}{E_0 h} \frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} - \\ & - \frac{K\alpha_1 R^2}{E_0 h} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \cos \theta - 2 \frac{\partial w}{\partial \theta} \sin \theta - w \cos \theta \right) - \frac{\alpha_2 KR^2}{E_0 h} \left(\frac{\partial^2 w}{\partial \theta^2} \cos 3\theta - \frac{\partial w}{\partial \theta} 6 \sin 3\theta - 9w \cos 3\theta \right) - \\ & - \frac{R^2 \rho}{E_0} \left(\frac{\partial^3 u}{\partial \xi \partial t^2} - \frac{\partial^3 U}{\partial \theta \partial t^2} - \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} \right) + \rho_0 \Phi_{mn} \frac{R_0}{Eh} \left(R_0^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial t^2} + V^2 \frac{\partial^4 w}{\partial \theta^2 \partial \xi^2} \right) = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

После преобразований полученная ранее в [1] система линейных однородных алгебраических уравнений, записанная в виде

$$a_{m,m-3} b_{n,m-3} + a_{m,m-1} b_{n,m-1} + a_{m,m} b_{n,m} + a_{m,m+1} b_{n,m+1} + a_{m,m+3} b_{n,m+3} = 0, \quad (5)$$

не изменит своей основной сути, однако коэффициенты уравнения с учетом протекающей жидкости будут иными:

$$a_{m,m} = A_{mn} - B_{mn} w_{mn}^2; \quad a_{m,m+1} = -\frac{m^2(m+1)^2}{2} k^* a_1; \quad a_{m,m+3} = -\frac{m^2(m+3)^2}{2} k^* a_1; \quad (6)$$

$$A_{mn} = \lambda_n^4 + \eta m^4 (m^2 - 1) \left(m^2 - 1 + \frac{p^*}{\eta} \right) + K^* m^4 - \lambda_n^4 \rho_0 \Phi_{mn} V^2 m^4 h_v.$$

$$B_{mn} = Rhp^* (\lambda_n^2 h_v + m^2 + m^4) + \rho_0^* \Phi_{mn} R_0^2 m^4, \quad (7)$$

$$\text{где } p^* = p_0 \frac{R}{E_0 h h_v^2}, \rho^* = \rho_0 \frac{R \rho}{E_0 h h_v^2}, k^* = \frac{R^2 k}{E_0 h h_v^2}.$$

Дальнейшее решение задачи сводится к нахождению собственных чисел λ – спектра частот свободных колебаний $\omega_{m,n}^2$, которые зависят от волновых чисел m и n с учетом различных геометрических и механических характеристик. Для наглядности был проведен численный эксперимент как для газопровода с использованием уравнений, полученных в [2], так и для нефтепровода.

3. Результаты и обсуждения / Results and discussion

В первую очередь исследуем влияние внутреннего рабочего давления P на частоты собственных колебаний при различных толщинах железобетонной оболочки при фиксированных значениях $K = 400\,000 \text{ N/m}^3$, $R = 0.72 \text{ m}$, $L/R_0 = 6$, $h_s = 0.01 \text{ m}$ для газопровода и нефтепровода. Результаты исследования приведены в таблице 1 и представлены на графике (рис. 2).

Анализ результатов, приведенных в таблице 1 и на рис. 2, позволяет сделать вывод, что увеличение толщины слоя железобетона неоднородной трубы приводит к увеличению частот свободных колебаний и, как следствие, жесткости газопровода и нефтепровода. Так, при толщине железобетонного слоя 3 см и внутреннем рабочем давлении 2 МПа частота свободных колебаний нефтепровода составила 47.7 Гц, а при увеличении защитного слоя до 5 см – 57.6 Гц.

Таблица 1. Влияние внутреннего рабочего давления P на частоты собственных колебаний при различной толщине железобетонной оболочки для газопровода и нефтепровода
Table 1. The effect of internal operating pressure P on natural frequencies for varying reinforced concrete shell thickness in gas and oil pipelines

$P, \text{ МПа}$	Газопровод								
	$h_b = 0.03 \text{ m}$			$h_b = 0.04 \text{ m}$			$h_b = 0.05 \text{ m}$		
	$\omega_{1,1}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,2}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,3}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,1}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,2}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,3}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,1}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,2}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,3}, \text{ Гц}$
0	161.73	66.38	110.86	155.64	70.97	138.33	150.89	76.6	164.8
2	161.73	72.78	122.44	155.64	76.03	146.26	150.89	80.65	170.57
4	161.73	78.66	133.01	155.64	80.78	153.77	150.89	84.52	176.15
6	161.73	84.13	142.79	155.64	85.26	160.94	150.89	88.21	181.55
8	161.73	89.27	151.95	155.64	89.52	167.8	150.89	91.75	186.8
10	161.73	94.12	160.59	155.64	93.58	174.39	150.89	95.16	191.91
12	161.73	98.74	168.79	155.64	97.47	180.75	150.89	98.46	196.88
$P, \text{ МПа}$	Нефтепровод								
	$h_b = 0.03 \text{ m}$			$h_b = 0.04 \text{ m}$			$h_b = 0.05 \text{ m}$		
	$\omega_{1,1}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,2}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,3}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,1}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,2}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,3}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,1}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,2}, \text{ Гц}$	$\omega_{1,3}, \text{ Гц}$
0	104.02	43.5	74.69	105.06	48.74	97.46	105.79	54.57	120.24
2	104.02	47.7	82.49	105.06	52.22	103.04	105.79	57.46	124.45
4	104.02	51.55	89.61	105.06	55.48	108.34	105.79	60.21	128.52
6	104.02	55.13	96.2	105.06	58.55	113.39	105.79	62.85	132.46
8	104.02	58.5	102.37	105.06	61.48	118.22	105.79	65.37	136.29
10	104.02	61.68	108.19	105.06	64.27	122.87	105.79	67.8	140.02
12	104.02	64.71	113.71	105.06	66.94	127.34	105.79	70.15	143.65

Примечание: $K = 400\,000 \text{ N/m}^3$, $R = 0.72 \text{ m}$, $L/R_0 = 6$, $h_s = 0.01 \text{ m}$

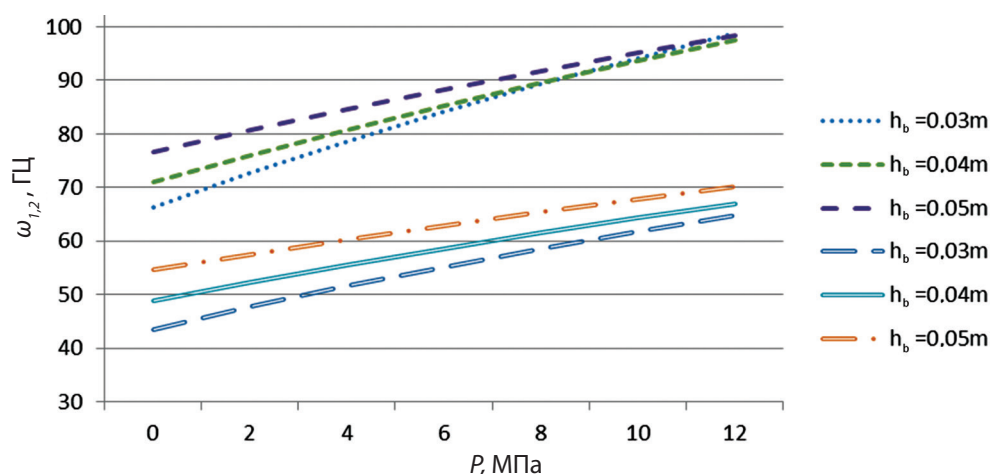


Рис. 2. Влияние внутреннего рабочего давления P на частоты собственных колебаний при различной толщине железобетонной оболочки для газопровода и нефтепровода (график составлен автором)

Fig. 2. The effect of internal operating pressure P on natural frequencies for varying reinforced concrete shell thickness in gas and oil pipelines (graph by the author)

Во-вторых, проведем анализ влияния коэффициента постели грунта на частоту свободных колебаний трубопровода при различных значениях внутреннего рабочего давления от 0 до 10 МПа и при фиксированных значениях $R = 0.72$ м, $L/R_0 = 6$, $h_s = 0.01$ м, $h_b = 0.03$ м для газопровода и нефтепровода.

Исходя из результатов, приведенных в таблице 2, можно сказать, что с увеличением коэффициента постели K частоты свободных колебаний $\omega_{1,2}$ возрастают: при прочих равных условиях и увеличении коэффициента постели с 10 до 400 кН/м³ частота свободных колебаний возросла во всех приведенных экспериментах. Однако также стоит отметить, что с увеличением коэффициента постели рост частоты свободных колебаний мал по сравнению с ростом частоты свободных колебаний других исследуемых параметров и требует дополнительных исследований.

В-третьих, исследуем влияние длины участка трубопровода при переменном давлении на частоты свободных колебаний заглубленного в грунт трубопровода при $K = 400\,000$ Н/м³, $R = 0.72$ м, $h_s = 0.01$ м для газопровода и нефтепровода (таблица 3, рис. 3).

Таблица 2. Влияние коэффициента постели грунта K на частоту свободных колебаний трубопровода при различных значениях внутреннего рабочего давления от 0 до 10 МПа для газопровода

Table 2. Effect of soil spring constant K on the natural frequency of a pipeline for different internal operating pressures ranging from 0 to 10 MPa for a gas pipeline

K , кН/м ³	Газопровод								
	$P = 10$ МПа			$P = 5$ МПа			$P = 0$ МПа		
	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц
10	93.432	82.789	159.14	93.432	67.932	136.262	93.432	48.738	108.669
30	93.439	82.802	159.148	93.439	67.948	136.271	93.439	48.76	108.68
70	93.452	82.828	159.163	93.452	67.979	136.289	93.452	48.804	108.703
130	93.473	82.867	159.186	93.473	68.027	136.315	93.473	48.87	108.736
200	93.496	82.913	159.213	93.496	68.082	136.347	93.496	48.947	108.775
270	93.52	82.958	159.24	93.52	68.138	136.378	93.52	49.024	108.815
400	93.564	83.043	159.29	93.564	68.24	136.4	93.564	49.167	108.88

Примечание: $R = 0.72$ м, $L/R = 6$, $h_s = 0.01$ м, $h_b = 0.03$ м

Таблица 3. Влияние внутреннего рабочего давления P на частоты собственных колебаний при различной длине участка для газопровода и нефтепровода
Table 3. The effect of internal operating pressure P on natural frequencies at varying section lengths for gas and oil pipelines

P , МПа	Газопровод								
	$L/R = 6$			$L/R = 8$			$L/R = 10$		
	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц
0	161.73	66.38	110.86	93.56	49.17	108.89	150.89	76.6	164.8
2	161.73	72.78	122.44	93.56	57.56	120.66	150.89	80.65	170.57
4	161.73	78.66	133.01	93.56	64.88	131.39	150.89	84.52	176.15
6	161.73	84.13	142.79	93.56	71.45	141.3	150.89	88.21	181.55
8	161.73	89.27	151.95	93.56	77.46	150.57	150.89	91.75	186.8
10	161.73	94.12	160.59	93.56	83.04	159.29	150.89	95.16	191.91
12	161.73	98.74	168.79	93.56	88.27	167.56	150.89	98.46	196.88
P , МПа	Нефтепровод								
	$L/R = 6$			$L/R = 8$			$L/R = 10$		
	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц	$\omega_{1,1}$, Гц	$\omega_{1,2}$, Гц	$\omega_{1,3}$, Гц
0	104.02	43.5	74.69	58.89	32.1	73.15	105.79	54.57	120.24
2	104.02	47.7	82.49	58.89	37.58	81.06	105.79	57.46	124.45
4	104.02	51.55	89.61	58.89	42.35	88.26	105.79	60.21	128.52
6	104.02	55.13	96.2	58.89	46.64	94.92	105.79	62.85	132.46
8	104.02	58.5	102.37	58.89	50.57	101.14	105.79	65.37	136.29
10	104.02	61.68	108.19	58.89	54.22	107.01	105.79	67.8	140.02
12	104.02	64.71	113.71	58.89	57.62	112.56	105.79	70.15	143.65

Примечание: $K = 400\,000\text{ N/m}^3$, $R = 0.72\text{ m}$, $L/R_0 = 6$, $h_s = 0.01\text{ m}$, $h_b = 0.03\text{ m}$

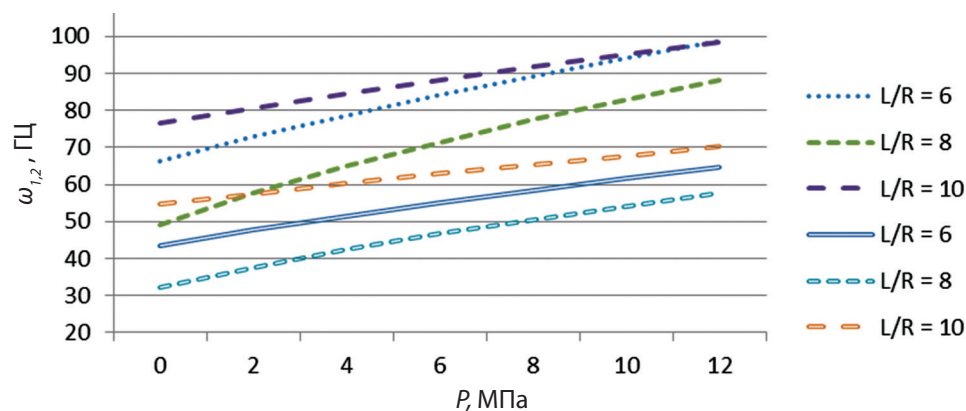


Рис. 3. Влияние внутреннего рабочего давления P на частоты собственных колебаний при различной длине участка для газопровода и нефтепровода (график составлен автором)
Fig. 3. The effect of internal operating pressure P on natural frequencies at varying section lengths for gas and oil pipelines (graph by the author)

Согласно результатам, приведенным в таблице 3 и на рис. 3, увеличение внутреннего рабочего давления приводит к увеличению частот свободных колебаний и жесткости газопровода и нефтепровода. При внутреннем рабочем давлении 2 МПа частота свободных колебаний нефтепровода составила 47.7 Гц. С увеличением внутреннего рабочего давления до 12 МПа произошло увеличение частоты свободных колебаний до 64.7 Гц.

4. Заключение / Conclusions

Исследование показало, что форма колебаний нефтепровода – оболочечная, т. к. минимальные значения частоты собственных колебаний $\omega_{1,2}$ реализуются при волновых числах $m = 2, n = 1$. Таким образом, несмотря на наличие слоя железобетона, трубопровод остается тонкостенным и требует иного подхода к определению динамических характеристик и расчета прочности.

Исходя из того, что увеличение толщины железобетонной рубашки привело к увеличению частоты свободных колебаний, необходимо включать ее физические и геометрические характеристики в расчет трубопроводных систем.

В зависимости от различных факторов при прочих равных условиях значения частоты свободных колебаний нефтепровода ниже, чем значения частоты свободных колебаний газопровода. Так, в исследовании влияния коэффициента постели грунта на частоту свободных колебаний при $K = 10 \text{ кН/м}^3$ частота свободных колебаний нефтепровода составила 58.8 Гц, тогда как у газопровода при тех же условиях – 93.4 Гц, что на ~59 % выше. Подобная тенденция наблюдается во всех вышеописанных экспериментах. Таким образом, можно сделать вывод, что динамические характеристики трубопроводов зависят от типа трансформируемого продукта и требуют точного расчета для различных нефтепродуктов, что подтверждает необходимость дальнейших исследований.



Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest. The author declares no relevant conflict of interest.

Список литературы

1. Денисов Г. В. К расчету участков заглубленных магистральных трубопроводов с конструктивными включениями на сейсмическое воздействие. *Современные проблемы науки и образования*. 2014;(4):200. URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14133>.
2. Волинец С. И. Колебания тонкостенных неоднородных оболочек в упругой среде с учетом внутреннего рабочего давления. *Вестн газовой науки*. 2021;(4):203–207. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49095501>.
3. Хакимов А. Г., Юлмухаметов А. А. Изгибные колебания трубопровода на упругих опорах с движущейся жидкостью. *Многофазные системы*. 2019;14(1):10–16. <https://doi.org/10.21662/mfs2019.1.002>
4. Шакирьянов М. М. Пространственные нелинейные колебания трубопровода при действии внутреннего ударного давления. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2019;(6):76–84. <https://doi.org/10.1134/S0572329919060114>
5. Шагиев В. Р., Ахтямов А. М. Идентификация закрепления трубопровода с использованием минимального количества собственных частот. *Математические структуры и моделирование*. 2018;(1):95–107. <https://doi.org/10.25513/2222-8772.2018.1.95-107>
6. Акуленко Л. Д., Иванов М. И., Коровина Л. И., Нестеров С. В. Основные свойства собственных колебаний протяженного участка трубопровода. *Известия Российской академии наук. Механика твердого тела*. 2013;(4):119–134. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20194647>.
7. Sollund H., Vedeld K. A semi-analytical model for free vibrations of free spanning offshore pipelines. *Research Report in Mechanics*. No. 2. Oslo: University of Oslo; 2012. URL: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/34444/2012-2.pdf?sequence=1>
8. Lazakis I., Gkerekos C., Theotokatos G. Investigating an SVM-driven, one-class approach to estimating ship systems condition. *Ships and Offshore Structures*. 2018;14(5):432–441. <https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1500189>
9. Shao Y. F., Fan X., Shu S., Ding H., Chen L.-Q. Natural frequencies, critical velocity and equilibriums of fixed-fixed Timoshenko pipes conveying fluid. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2022;10:1623–1635. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00469-0>
10. Xü W., Xie W.-D., Gao X.-F., Ma Y.-X. Study on vortex-induced vibrations (VIV) of free spanning pipeline considering pipe-soil interaction boundary conditions. *Chuan Bo Li Xue/Journal of Ship Mechanics*. 2018;51:446–453. <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1007-7294.2018.04.007>
11. Yang X., Yang T., Jin J. Dynamic stability of a beam-model viscoelastic pipe for conveying pulsative fluid. *Acta Mechanica Sinica*. 2007;20:350–356. <https://doi.org/10.1007/s10338-007-0741-x>
12. Xia Tan, You-Qi Tang. Free vibration analysis of Timoshenko pipes with fixed boundary conditions conveying high velocity fluid. *Heliyon*. 2023;9(4):e14716. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14716>

13. Флюгге В. *Статика и динамика оболочек*. Москва: Госстройиздат, 1961.
14. Ильин В. П. Применение полубезмоментной теории к задачам расчета тонкостенных труб. Проблемы расчета пространственных конструкций. В сб.: *Труды МИСИ*. Москва: МИСИ; 1980. С. 45–55.
15. Соколов В. Г., Дмитриев А. В., Волинец С. И. Свободные колебания тонкостенных газопроводов с учетом влияния продольной силы при траншейной прокладке. *Жилищное строительство*. 2024;(9):67–74. <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-67-74>
16. Соколов В. Г., Дмитриев А. В. Свободные колебания подземных прямолинейных тонкостенных участков газопроводов. *Вестник гражданских инженеров*. 2019;(2):29–34 <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-2-29-34>

References

1. Denisov G. V. About calculation buried pipelines with constructive inclusions on seismic action. *Sovremennyye problemy nauki i obrazovaniya*. 2014;(4):200. (In Russ.) URL: <https://science-education.ru/ru/article/view?id=14133>.
2. Volynets S. I. Oscillations of thin-walled heterogeneous shells within elastic medium in regard of operational pressure. *Vesti gazovoy nauki*. 2021;(4):203–207. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=49095501>.
3. Khakimov A. G., Yulmukhametov A. A. Flexural vibrations of the pipeline on elastic supports with moving fluid. *Multiphase Systems*. 2019;14(1):10–16. (In Russ.) <https://doi.org/10.21662/mfs2019.1.002>
4. Shakiryayev M. M. Spatial nonlinear oscillations of a pipeline under the action of internal shock pressure. *Mechanics of Solids*. 2019;54(8):1189–1196. <https://doi.org/10.3103/S0025654419080090>
5. Shagiev V. R., Akhtyamov A. M. Identification of pipe fastening using the minimum number of natural frequencies. *Mathematical Structures and Modeling*. 2018;(1):95–107. (In Russ.) <https://doi.org/10.25513/2222-8772.2018.1.95-107>
6. Akulenko L. D., Ivanov M. I., Nesterov S. V., Korovina L. I. Basic properties of natural vibrations of an extended segment of a pipeline. *Mechanics of Solids*. 2013;48(4):458–472. <https://doi.org/10.3103/S0025654413040146>
7. Sollund H., Vedeld K. A semi-analytical model for free vibrations of free spanning offshore pipelines. *Research Report in Mechanics*. No. 2. Oslo: University of Oslo; 2012. URL: <https://www.duo.uio.no/bitstream/handle/10852/34444/2012-2.pdf?sequence=1>
8. Lazakis I., Gkerekos C., Theotokatos G. Investigating an SVM-driven, one-class approach to estimating ship systems condition. *Ships and Offshore Structures*. 2018;14(5):432–441. <https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1500189>
9. Shao Y. F., Fan X., Shu S., Ding H., Chen L.-Q. Natural frequencies, critical velocity and equilibriums of fixed–fixed Timoshenko pipes conveying fluid. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2022;10:1623–1635. <https://doi.org/10.1007/s42417-022-00469-0>
10. Xü W., Xie W.-D., Gao X.-F., Ma Y.-X. Study on vortex-induced vibrations (VIV) of free spanning pipeline considering pipe-soil interaction boundary conditions. *Chuan Bo Li Xue/Journal of Ship Mechanics*. 2018;51:446–453. <http://dx.doi.org/10.3969/j.issn.1007-7294.2018.04.007>
11. Yang X., Yang T., Jin J. Dynamic stability of a beam-model viscoelastic pipe for conveying pulsative fluid. *Acta Mechanica Solida Sinica*. 2007;20:350–356. <https://doi.org/10.1007/s10338-007-0741-x>
12. Xia Tan, You-Qi Tang. Free vibration analysis of Timoshenko pipes with fixed boundary conditions conveying high velocity fluid. *Heliyon*. 2023;9(4):e14716. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14716>
13. Flyugge V. *Statics and dynamics of shells*. Moscow: Gosstroyizdat, 1961. (In Russ.)
14. Il'in V. P. Application of semi-integral theory to the problems of thin-walled pipes calculation. Problems of calculation of spatial structures. In: *Trudy MISI*. Moscow: MCEI; 1980. P. 45–55. (In Russ.)
15. Sokolov V. G., Dmitriev A. V., Volynets S. I. Free vibrations of thin-walled gas pipelines taking into account the influence of longitudinal force during trench laying. *Housing Construction*. 2024;(9):67–74. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0044-4472-2024-9-67-74>
16. Sokolov V. G., Dmitriev A. V. Free oscillations of straight thin walled underground pipelines. *Bulletin of Civil Engineers*. 2019;(2):29–34 (In Russ.) <https://doi.org/10.23968/1999-5571-2019-16-2-29-34>



Информация об авторе

Волинец Святослав Игоревич, ассистент кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, volynec-s@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5236-1981>

Information about the author

Svyatoslav I. Volynets, Assistant in the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, volynec-s@bk.ru, <https://orcid.org/0000-0001-5236-1981>

Получена 11 ноября 2024 г., одобрена 02 февраля 2025 г., принята к публикации 20 февраля 2025 г.
Received 11 November 2024, Approved 02 February 2025, Accepted for publication 20 February 2025



Влияние сезонности на формирование потребности в запасных частях автомобилей

Ю. Д. Ишкин¹, Н. С. Захаров¹, А. В. Рассохин², Е. Г. Ишкина¹ ✉

¹ Тюменский индустриальный университет, ул. Володарского, 38, Тюмень, 625000, Российская Федерация

² ООО «ТюменьАвтоЛуч», ул. Госпаровская, 7, Тюмень, 625002, Российская Федерация

✉ ishkinaeg@tyuiu.ru



Аннотация. В структуре эксплуатационных затрат автомобильного транспорта расходы на приобретение и хранение запасов запасных частей составляют до 45 %. Чаще всего система управления запасами основывается на анализе спроса за прошлые периоды. На формирование номенклатуры и количественной потребности в запасных частях влияет ряд факторов: надежность автомобиля, интенсивность и условия его эксплуатации, спрос, наличие запаса у торговых сетей и прочие. На предприятии самым значимым критерием формирования запаса являются общие затраты, которые включают затраты на приобретение, доставку и обслуживание запасов. Исследование показало, что не существует единой методики определения нормы запаса автомобильных запасных частей. Установлено, что на расход запасных частей влияют интенсивность эксплуатации и надежность автомобилей, а также сезонные колебания. Анализ статистических данных подтвердил зависимость нормы запаса запчастей от сезона, зависимость описывается гармонической моделью. Установлено, что существуют некоторые сдвиги крайних значений в зависимости от группы запасных частей в пределах одного сезона. При их более точном учете можно снизить затраты на хранение запаса. Предлагаемый подход к корректированию нормативов запаса запасных частей на складе позволит уменьшить срок хранения запасных частей и, как следствие, повысить эффективность управления запасами. По рассматриваемым статистическим данным эффективность обосновывается сокращением запасов на сумму в 470 тыс. рублей за год. Данную методику корректирования норматива запасных частей можно использовать как на сервисных, так и на эксплуатационных предприятиях.

Ключевые слова: автомобильные запасные части, управление запасами запасных частей, номенклатура запасных частей, сезонные условия, условия эксплуатации

Для цитирования: Ишкин Ю. Д., Захаров Н. С., Рассохин А. В., Ишкина Е. Г. Влияние сезонности на формирование потребности в запасных частях автомобилей. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):102–111 <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-102-111> EDN: NUUAJS

The impact of seasonality on spare part demand for automobiles

Yuri D. Ishkin¹, Nikolai S. Zakharov¹, Alexander V. Rassokhin², Elena G. Ishkina¹ ✉

¹ Industrial University of Tyumen, 38 Volodarskogo St., Tyumen, 625000, Russian Federation

² LLC "TyumenAutoLuch", 7 Gosparovskaya St., Tyumen, 625002, Russian Federation

✉ ishkinaeg@tyuiu.ru



Abstract. In structure of road transport operating costs, expenses for purchasing and storing spare parts can account for up to 45 %. Inventory management systems are most often based on analyzing past demand. A number

of factors influence the range and quantity of spare parts needed: vehicle reliability, intensity and conditions of operation, demand, inventory availability at retail networks, and other considerations. At the enterprise level, the most significant criterion for inventory management is the total cost, which includes procurement, delivery and maintenance costs. This study revealed that there is no unified method for determining the optimal stock level of vehicle spare parts. The authors found that spare parts consumption is affected by operational intensity and vehicle reliability, as well as seasonal variations. Analysis of statistical data confirmed the seasonal dependence of spare parts stock levels. This dependence can be described by a harmonic model. It was found that there are some shifts in extreme values depending on the spare part group within a single season. More accurate accounting for these shifts can reduce inventory holding costs. The proposed approach to adjusting spare parts stock level norms in the warehouse will reduce the storage period of spare parts and, consequently, increase the efficiency of inventory management. Based on the studied statistical data, this efficiency is justified by a reduction in inventory valued at 470000 rubles per year. This method of adjusting spare parts stock level norms is applicable to both service and operational enterprises.

Keywords: vehicle spare parts, spare parts inventory management, spare parts range, seasonal conditions, operating conditions

For citation: Ishkin Yu. D., Zakharov N. S., Rassokhin A. V., Ishkina E. G. The impact of seasonality on spare part demand for automobiles. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):102–111. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-102-111>



1. Введение / Introduction

Расходы на запасы запасных частей являются одной из значительных составляющих затрат сервисных и эксплуатационных предприятий. Для формирования оптимального запаса запасных частей предприятию необходимо определить для себя политику управления запасами, которая бы удовлетворяла запросы с учетом внутренних и внешних процессов по всей стоимостной цепочке материального потока [1]. Кроме удовлетворения потребностей предприятий, должны быть определены оптимальные по экономическим показателям количественные и качественные показатели. Чаще всего применяется вытягивающая система управления запасами, основанная на потребительском спросе, который формирует цепочку распределения от производителя к потребителю. Предприятия, имеющие опыт работы с запасами, как правило, планируют запасы запасных частей исходя из статистики прошлых периодов и принимая во внимание имеющуюся конъюнктуру спроса, который изменяется в разрезе календарного года. Также часто используют комбинированный подход, объединяющий позицию запаса и влияние рыночных условий [2], а для запасных частей дополнительно учитывается надежность и интенсивность эксплуатации автомобилей.

Таким образом, спрос на запасные части определяет политику управления запасами, которая может изменяться от одного подхода к другому в зависимости от ситуации на рынке. Номенклатура запасных частей, имеющих у конкурентов, также влияет на политику управления запасами. При планировании необходимо учитывать, что фирма может потерять часть клиентов, если у нее в наличии не окажется определенных узлов и агрегатов. Отсутствие деталей ведет к потере прибыли и ухудшению репутации сервисной фирмы, поэтому при расчете нормы запаса необходимо учитывать данный фактор. Имеющиеся запасы запасных частей у конкурентов также подвержены влиянию спроса. Расходы на формирование, обслуживание и хранение запасов являются основными в управлении запасами и определяются как доля от средней стоимости запасов. Средняя стоимость запасов формируется с учетом затрат на хранение, процента неликвидности, страхования, налогов и расходов, связанных с содержанием производственной инфраструктуры. Для управления запасами важен размер годовых затрат на содержание запасов в зависимости от стоимости имеющихся запасов [3]. Это позволяет выразить затраты в процентах от средней стоимости запасов, что дает воз-

возможность сравнивать эффективность управления запасами с конкурентами или в разные периоды. Важно отметить, что точность оценки этих затрат может варьироваться в зависимости от методов учета и специфики бизнеса, поэтому компаниям следует регулярно пересматривать свои подходы к оценке и управлению запасами [4].

В современных экономических условиях сервисные предприятия применяют отличную от эксплуатационных автотранспортных компаний стратегию управления запасами запасных частей [5]. Актуальной задачей для них является определение экономически обоснованной нормы запасных частей, которые следует хранить на складе. Запасные части можно разделить на три категории: предлагаемые множеством поставщиков (широкого потребления), изготавливаемые специализированными заводами (конкурирующие) и производителями автомобиля и их субподрядчиками (неконкурирующие). В условиях усиливающейся конкуренции сервисные предприятия ориентируют покупателей на приобретение исключительно оригинальных запасных частей, предупреждая о негативных последствиях использования неоригинальных [6].

Эффективное управление запасами запасных частей включает:

- создание системы оперативного контроля фактического размера запаса и его своевременного пополнения в соответствии с установленной на предприятии нормой;
- оптимизацию запаса запасных частей (определение необходимого размера запаса, установление нормы запаса).

На расход запасных частей влияет интенсивность эксплуатации и надежность автомобилей, которые, в свою очередь, зависят также от сезонных колебаний. Под сезонными колебаниями подразумевается смена сезона, переход с летней эксплуатации на зимнюю и наоборот. Спрос на запасные части определяется исходя из надежности автомобиля, которая зависит от условий и интенсивности эксплуатации [5]. К условиям эксплуатации относят природно-климатические изменения, выражающиеся в сезонных колебаниях [7], они учитываются при формировании потребности в запасах для сезонного обслуживания. Сезонные колебания влияют на надежность автомобиля, так как изменения температуры окружающего воздуха, дорожного покрытия (гололед, вода, песок), осадки (дождь, снег) влияют на техническое состояние автомобиля.

Интенсивность эксплуатации подразумевает число техники, эксплуатируемой в тот или иной сезон. Некоторые автовладельцы вообще не эксплуатируют автомобиль в зимний период, в летнее же время использование автомобилей возрастает в связи с поездками за город и отпусками, но наибольшее влияние сезонность оказывает на спрос. При смене сезона (как правило, пик сезонных обслуживаний выпадает на осенний и весенний периоды) количество запасных частей, заказываемых и покупаемых клиентами, резко возрастает, то есть увеличивается спрос на детали определенной номенклатуры. Как правило, наиболее востребованы запасные части и сменные элементы, необходимые для выполнения работ в этот период (фильтры, различного вида уплотнения, элементы подвески и т. п.).

Поэтому при планировании и расчете необходимой нормы запасных частей сезонные колебания необходимо учитывать, так как они оказывают непосредственное влияние на величину спроса в данные периоды. Структуру парка автомобилей можно рассматривать по двум категориям: возраст и марка/модель. Возраст обслуживаемой техники также оказывает определенное влияние на спрос, на те или иные запасные части и агрегаты. По мере устаревания техника требует большего числа обслуживаний, расход запчастей увеличивается, повышается и спрос на запасные части к данным моделям.

Стоит также отметить, что даже запасные части и узлы одной марки могут не подходить разным моделям. Поэтому модельная структура обслуживаемого парка автомобилей также влияет на норму запаса запчастей. В целом структура парка обслуживаемых автомобилей, старение парка и модельное разнообразие определяют потребность в тех или иных запчастях и тем самым формируют на них спрос. Но стоит заметить, что структура парка оказывает некоторое влияние и на политику

управления запасами. При планировании запасов необходимо принять во внимание количество и возраст обслуживаемых автомобилей, а также разнообразие марок в данном регионе [8].

Спрос на дорогостоящие детали с низким уровнем потребления традиционно воспринимается как дискретный. В то же время зависимый спрос на взаимозаменяемые детали и комплектующие (с положительной и отрицательной корреляцией соответственно) часто наблюдается в реальной практике, но является неизученной закономерностью [9].

При установлении норм запасов запасных частей применяются три категории методов: эвристические, технико-экономические и экономико-математические. При эвристическом методе эксперты проводят анализ существующего рынка и имеющейся статистики за предыдущие периоды, далее принимается решение о минимально необходимых запасах с учетом изменяющегося спроса. Техничко-экономические методы предполагают деление общего запаса на отдельные группы, в которых рассчитываются страховые, текущие и сезонные запасы [10]. Этот метод позволяет достаточно точно определить нужный объем запасов запасных частей по группам, но является достаточно трудозатратным. Экономико-математические методы рассматривают спрос на товары как случайный процесс, который можно описать с помощью математической статистики. Одним из простейших методов в этой категории является метод экстраполяции (сглаживания), позволяющий перенести темпы формирования запасов из прошлого в будущее [11].

Сбытовая сеть многих крупных компаний организована так, чтобы клиент мог получить детали группы А немедленно, а детали групп В и С – в течение суток после оформления заказа. Для обеспечения такого уровня обслуживания на складах дилеров хранятся запасы деталей высокого спроса на один-два месяца, на складах импортеров – на три-четыре месяца для товаров с высоким и стабильным спросом, а на промежуточных складах – аналогичные запасы для товаров с нерегулярным спросом [12]. Важно отметить, что ABC-классификация является относительной и зависит от уровня склада. Некоторые компании используют структуру, при которой запасы на складах рассматриваются как единый объем и могут быть перераспределены по усмотрению руководства [13].

Уровень удовлетворения спроса обычно не превышает 90–95 %. Запчасти с нерегулярным спросом приносят небольшой процент выручки и хранятся в основном из соображений престижа и для поддержания рыночных позиций. Часто дилерам выдвигают требования по поддержанию запасов определенных деталей или на определенную сумму. Распределяя всю номенклатуру запасных частей, включая редкие позиции, импортеры могут сократить свои запасы за счет неходовых товаров. В торговле запасными частями импортеры и экспортеры чаще всего используют систему с фиксированным интервалом заказа и фиксированным объемом на уровне дилеров и импортеров. Основное планирование обычно осуществляется на трехмесячный период: заказы на первый месяц считаются обязательными, а на второй и третий – представляют собой прогноз спроса (скользящее планирование). Для запчастей к автомобилям, которые уже сняты с производства, применяются полугодовые заказы [14].

Сезонные колебания при планировании запасов запасных частей учитывают, как правило, эксплуатационные предприятия, так как процесс эксплуатации и парк автомобилей известен. В ранее проведенных исследованиях при планировании запасов запасных частей для сервисных предприятий данный фактор учитывался только в приложении к сезонным обслуживаниям, без корректирования количества единиц запаса с учетом сезонности. С учетом изложенного целью исследования являлось определение экономически целесообразной нормы запасных частей, подлежащей хранению на складе сервисного предприятия с учетом сезонных колебаний.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Влияние значимых для сервисных предприятий факторов на норму запаса запасных частей, определенное на основе математической статистики и системного анализа, представлено на рис. 1.

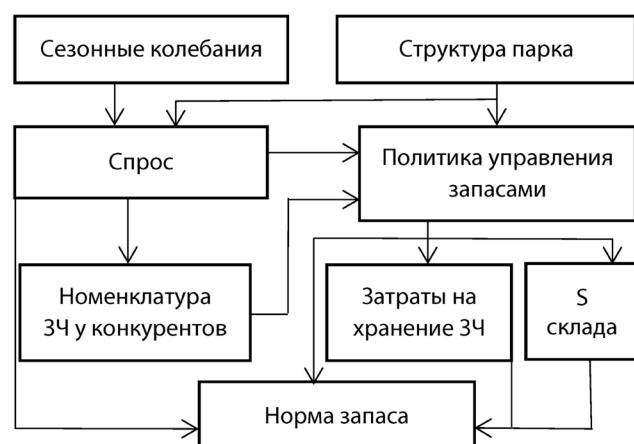


Рис. 1. Влияние разных факторов на норму запаса запасных частей (рисунок авторов)
Fig. 1. Influence of various factors on spare part stock levels (authors' illustration)

Для проведения исследования были собраны данные сервисного предприятия в виде перечня запасных частей, хранящихся на складе с указанием их количества, стоимости, периода хранения. Учитывая разнообразие моделей автомобилей одного производителя, запасные части из перечня были разбиты на семь групп. Каждая группа включала в себя запасные части, сходные по своему применению у разных моделей автомобилей этой марки, например, *тормозная система*. В этой группе собраны запасные части, которые относятся к тормозной системе европейских автомобилей (тормозные колодки, тормозные шланги, крепления, суппорты и т. п.).

В целях систематизации все запасные части были объединены в укрупненные группы. По-

следовательно рассмотрим изменения потребности в запасах запасных частей по шести группам с помощью традиционных методов экстраполяции и гармонического анализа.

Одна из существенных особенностей использования автомобилей – сезонное изменение условий и интенсивности их эксплуатации [15–16], соответственно, изменяются и параметры функционирования транспортной системы: производительность транспортных средств, техническая скорость, интенсивность расходования материальных ресурсов, поток требований на технические воздействия, потребность в трудовых ресурсах.

При решении ряда практических задач возникает потребность в прогнозировании параметров функционирования транспортной системы. При сезонном изменении они проходят через ряд состояний, последовательность которых представляет собой динамический ряд [17].

Для моделирования вариации параметров во времени можно использовать гармоническую модель [18] формирования нормы запаса запасных частей:

$$N_i = N_0 + \sum_{k=1}^g A_{yk} \cos(m(kT_i - T_{0k})), \quad (1)$$

где N_0 – среднее значение Y (количество запчастей) за год;

k – номер гармоники;

g – количество гармоник;

A_{yk} – полуамплитуда колебаний k -й гармоники;

m – интервал между T_i и T_{i+1} в градусах;

T_{0k} – начальная фаза колебания в градусах.

3. Результаты и обсуждения / Results and discussion

На основе гармонической модели и применения статистических методов обработки результатов получили графические изображения динамического распределения групп запасных частей (рис. 2).

По распределению запасных частей тормозной системы, фильтрующих элементов и резиновых уплотнений (рис. 2а, б) заметны максимальные значения спроса в весенний и осенний периоды. В условиях зимней эксплуатации увеличивается износ тормозных колодок и дисков из-за частых торможений на скользких дорогах. Высокая влажность и температурные колебания значительно влия-

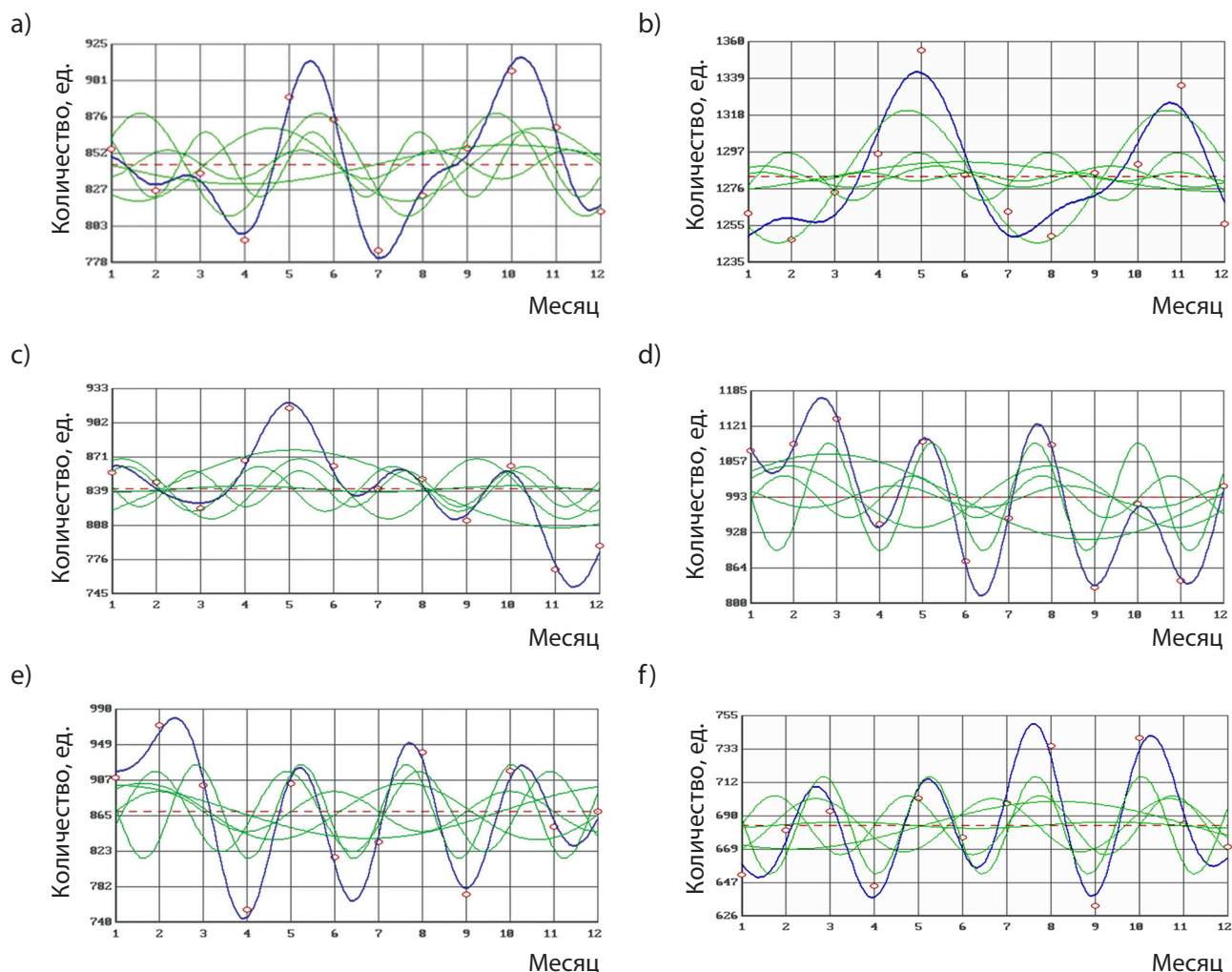


Рис. 2. Распределение: а) запасных частей тормозной системы; б) фильтрующих элементов и резиновых уплотнений; в) элементов подвески и рулевого управления; г) запасных частей электрооборудования; д) запасных частей трансмиссии; е) запчастей системы питания, смазки, охлаждения (рисунок авторов)

Fig. 2. Distribution of: a) brake system spare parts; b) filter elements and rubber seals; c) suspension and steering components; d) electrical equipment spare parts; e) transmission spare parts; f) fuel, oil, and coolant system parts (authors' illustration)

ют на износ тормозной системы и резиновых уплотнений. С приходом весны и осени многие авто-владельцы проводят сезонное обслуживание, что включает замену масляных фильтров, воздушных фильтров и жидкостей.

В весенний и осенний периоды из-за неровностей дорог и ям могут сильнее изнашиваться элементы подвески и рулевого управления, что подтверждается увеличением спроса на запасные части в мае (отсроченный результат зимней эксплуатации) (рис. 2с).

Холодные температуры могут негативно сказаться на работе аккумуляторов [19] и свечей зажигания, число их замен увеличивается в марте (рис. 2d). Повышение влажности в мае и августе может приводить к коррозии клемм аккумулятора и ухудшению его работы, вести к окислению и коррозии электрических соединений. В связи с этим требуется замена поврежденных проводов или разъемов. Влажность может негативно сказаться на работе систем зажигания, особенно на свечах

зажигания и катушках. Это может привести к проблемам с запуском двигателя и необходимости замены этих компонентов (рис. 2d).

В холодное время года вязкость трансмиссионного масла может увеличиться и, как следствие, привести к ухудшению работы трансмиссии. На работу трансмиссии также влияют дождь, снег и другие неблагоприятные погодные условия. Спрос на замены неисправных деталей увеличивается в феврале и августе (рис. 2e).

Также из-за неровностей и ям на дорогах после зимы увеличивается потребность в диагностике трансмиссии. В условиях низких температур может увеличиться износ сцепления, особенно если водитель часто использует сцепление для старта на скользких дорогах. Это может привести к необходимости замены дисков сцепления. Частые пробуксовки на скользких дорогах негативно влияют на такие элементы трансмиссии, как шестерни и подшипники.

В жаркую погоду увеличивается вероятность перегрева двигателя, что может привести к необходимости замены радиаторов, термостатов и других компонентов системы охлаждения в августе (рис. 2f). Ввиду частого использования кондиционеров в летний период возрастает потребность в ремонте и замене компонентов системы кондиционирования. Влажная среда может способствовать образованию плесени и грибка в системе кондиционирования и приводить к замене фильтров и необходимости очистки системы в октябре.

Суммарное количество запасных частей по всем группам, включая запасные части, не поддающиеся условной классификации, различные крепления, защиты и т. п. (седьмая группа), которые были использованы сервисным предприятием за 12 месяцев, представлено на рис. 3. В связи с тем, что все запасы анализировались вместе, на графике заметны более частые колебания, которые не отражают физический смысл возникновения потребности в запасных частях. Это подтверждает необходимость планирования запасных частей с учетом сходства применения.

Зная списочное количество запасных частей по группам в каждом месяце и рассчитав среднее количество запасных частей, можно определить примерный экономический эффект Э, получаемый за счет корректирования количества запасных частей на складе с учетом группы и сезонных колебаний:

$$\mathcal{E} = \sum \left(\left(\sum N_i - \sum N_{onmi} \right) \cdot C_{spi} \right), \quad (2)$$

где N_i – имеющееся количество запасных частей в группе за каждый месяц, шт.;

N_{onmi} – оптимальное количество запасных частей в группе за каждый месяц, шт.;

C_{spi} – условная средняя цена запасной части в каждой группе, руб.

Данные для расчета среднего количества запасных частей по группам с учетом сезонных колебаний представлены в таблице 1.

Расчет по формуле (2) показывает, что, учитывая разницу между списочным и средним количеством запасных частей в каждой группе, можно сократить запасы на 470 тыс. руб. в год. Полученное значение учитывает только закупочную стоимость запасных частей. При сокращении запасов сократятся также затраты на их содержание. Подобный расчет можно проводить по отдельным наименованиям запасных частей, по группам за один или несколько месяцев.

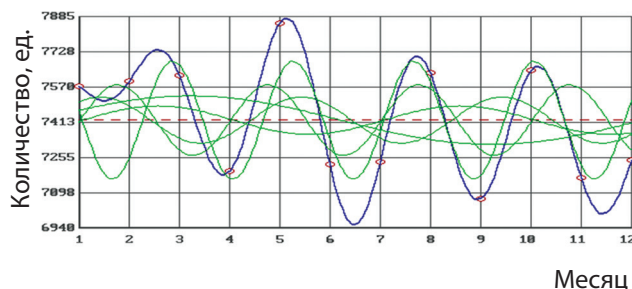


Рис. 3. Суммарное количество запасных частей по всем группам (рисунок авторов)

Fig. 3. Total number of spare parts across all groups (authors' illustration)

Таблица 1. Расчетные данные для определения экономического эффекта
Table 1. Data for economic effect calculation

Группа	Расчетные значения				
	Среднее количество запасных частей в группе N_{cp} , шт.	Списочное количество запасных частей в группе N , шт.	Разница между списочным и средним количеством запасных частей в каждой группе $N_{cp} - N$, шт.	Отклонение от списочного количества запасных частей в группе N , %	Условная средняя цена запасной части (комплекта) в каждой группе C_{cp} , тыс. руб.
Тормозная система	10 123	10 126	–3	0.03	5
Фильтрующие элементы и резиновые уплотнения	15 394	15 396	–2	0.01	3
Подвеска и рулевое управление	10 091	10 091	0	0	35
Электрооборудование	11 909	11 910	–1	0.01	15
Трансмиссия	10 347	10 436	–89	0.85	15
Система питания, смазки, охлаждения	8 242	8 208	34	0.41	27
Разное	22 880	22 881	1	0.01	17

4. Заключение / Conclusions

В ходе исследования было установлено влияние сезонности на формирование потребности в запасных частях. Выявлены группы запасных частей, наиболее чувствительных к изменениям сезона. Это трансмиссия, тормозная система и электрооборудование. На основе предлагаемой гармонической модели по имеющейся статистике можно определить оптимальную по затратам норму хранения запаса запасных частей. Полученные результаты возможно экстраполировать для формирования политики управления запасами запасных частей как для сервисных, так и для эксплуатационных предприятий, что позволит сократить затраты на запасные части на 10 и более процентов в год.



Вклад авторов. Авторы сделали эквивалентный 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

- Скляр Ю. И. Ю. Фролов А. В., Гутякулова Б. Б. Эффективное управление запасами: способы оптимизации учета ТМЦ экономического субъекта. *Современная экономика: проблемы и решения*. 2023;(8):103–117. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54816109>.
- Майзнер Н. А. Логистика в торговле: особенности, задачи и проблемы использования. *Экономика и предпринимательство*. 2015;(2):958–961. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23138330>.
- Кугач В. В., Мاستыков А. Н. Системы управления запасами. *Реценз.* 2007;(5):13–20. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20134397>.
- Матвеева Т. Ю. Методы оценки эффективности управления материальными запасами. *Вестник Поволжского государственного университета сервиса. Серия: Экономика*. 2011;(3):114–118. URL: <https://elibrary.ru/nupvrx>.
- Ишкин Ю. Д., Захаров Н. С., Ишкина Е. Г. Влияние надежности автомобилей на затраты на приобретение запасных частей. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(1):98–105. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-98-105>
- Воронина И. Ф., Судак Ф. М., Подгорный Д. С. Совершенствование методики прогнозирования потребности в запасных частях автомобилей на предприятиях автосервиса. *Вести автомобильно-дорожного института*. 2016;(2):16–22.

7. Elkhoully M., Alhadidi T., Rakha H. Modeling traffic vehicular counts at an urban intersection using complex seasonal modeling techniques. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2025;29(1):100040. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100040>
8. Бугримов В. А., Сарбаев В. И., Бородулин В. В. Имитационное моделирование потребностей предприятия автосервиса в запасных частях. *Транспорт. Транспортные сооружения. Экология*. 2018;(3):17–25. <https://doi.org/10.15593/24111678/2018.03.02>
9. Хасанов И. Х., Рассоха В. И., Саяхов А. И., Власов К. А. Показатели обеспечения станций технического обслуживания легковых автомобилей запасными частями и комплектующими. В сб.: *Прогрессивные технологии в транспортных системах: Евразийское сотрудничество, Оренбург, 09–11 декабря 2020 года*. Оренбург: Оренбургский государственный университет; 2020. С. 634–640. URL: <https://elibrary.ru/gmddxs>.
10. Булатов С. В. Повышение эффективности управления запасными частями на автотранспортном предприятии при наличии страхового запаса. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2021;(9):43–48. <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-9-43-48>
11. Elyashevich I., Sergeev V., Dybskaya V., Ivanova A. Category management for the operational resource procurement. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2024;9(3):100507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jik.2024.100507>
12. Зарипова Р. С., Чупаев А. В., Галямов Р. Р. Система управления запасами комплектующих на складе автосервиса. *Наука Красноярья*. 2020;9(3–4):51–55. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44447317>.
13. Волгин В. В. *Запасные части: особенности маркетинга и менеджмента*. Москва: Ось; 1997. 128 с.
14. Ряховский А. А. Особенности организации маркетинговой деятельности предприятий автосервиса. В кн.: *Россия на пороге XXI века*. Москва: МГУ; 2002.
15. Макарова А. Н., Захаров Н. С. *Корректирование нормативов периодичности технического обслуживания с учетом фактических условий и интенсивности эксплуатации автомобилей*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2019. 174 с. URL: <https://www.iprbookshop.ru/epd-reader?publicationId=101413>.
16. Захаров Н. С. *Влияние сезонных условий на процессы изменения качества автомобилей: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2000. 42 с. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22855792>.
17. Гусельников А. С., Захаров Н. С. Влияние сезонных условий на параметр потока отказов элементов системы питания двигателей автомобилей КАМАЗ-43118. *Интеллект. Инновации. Инвестиции*. 2023;(2):111–120. <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-111>
18. Эльяшевич И. П. Гармонический анализ при управлении запасами в логистике и цепях поставок. *Вестник Московского университета. Серия 6: Экономика*. 2023;(4):223–246. <https://doi.org/10.55959/MSU0130-0105-6-58-4-10>
19. Захаров Н. С., Сапоженков Н. О., Панфилов А. А., Петров В. С., Ракитин В. А. Влияние мощности электрооборудования на уровень заряженности автомобильных аккумуляторных батарей. *Научно-технический вестник Поволжья*. 2022;(2):34–37. URL: <https://elibrary.ru/gknjjb>.

References

1. Sklyarov I. Yu., Frolov A. V., Gutyakulova B. B. Effective inventory management: ways to optimize the accounting of goods and materials of an economic entity. *Modern Economics: Problems and Solutions*. 2023;(8):103–117. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=54816109>.
2. Mayzner N. A. Logistics in trade: features, problems and challenges. *Economy and Entrepreneurship*. 2015;(2):958–961. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=23138330>.
3. Kugach V. V., Mastikov A. N. Inventory management systems. *Recipe*. (In Russ.) 2007;(5):13–20. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=20134397>.
4. Matveeva T. Yu. Methods for assessing the effectiveness of assets management. *Bulletin of the Volga State University of Service. Series: Economy*. (In Russ.) 2011;(3):114–118. URL: <https://elibrary.ru/nupvrh>.
5. Ishkin Yu. D., Zakharov N. S., Ishkina E. G. Impact of vehicles reliability on the purchasing costs of spare parts. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(1):98–105. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-98-105>
6. Voronina I. F., Sudak F. M., Podgorny D. S. Technique improvement of the automobile parts demand management at service centers. *Bulletin of the Automobile and Highway Institute*. 2016;(2):16–22. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/ylmmpz>.
7. Elkhoully M., Alhadidi T., Rakha H. Modeling traffic vehicular counts at an urban intersection using complex seasonal modeling techniques. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2025;29(1):100040. <https://doi.org/10.1016/j.kscej.2024.100040>
8. Bugrimov V. A., Sarbaev V. I., Borodulin V. V. Simulation modeling of needs of a car service company in spare parts. *Transport. Transport Facilities. Ecology*. 2018;(3):17–25. (In Russ.) <https://doi.org/10.15593/24111678/2018.03.02>

9. Khasanov I. Kh., Rassokha V. I., Sayakhov A. I., Vlasov K. A. Technical station support indicators car service with spare vehicles parts and components. In: *Progressivnyye tekhnologii v transportnykh sistemakh: Yevraziyskoye sotrudnichestvo. Orenburg, December 09–11, 2020*. Orenburg: Orenburg State University; 2020. C. 634–640. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/gmdxds>.
10. Bulatov S. Improvement of the efficiency of duplicates at a motor transport enterprise if an insurance reserve is available. *Bulletin of Bryansk State Technical University*. 2021;(9):43–48. (In Russ.) <https://doi.org/10.30987/1999-8775-2021-9-43-48>
11. Elyashevich I., Sergeev V., Dybskaya V., Ivanova A. Category management for the operational resource procurement. *Journal of Innovation & Knowledge*. 2024;9(3):100507. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jik.2024.100507>
12. Zaripova R. S., Chupaev A. V., Galyamov R. R. Component stock management system at the car repair shop warehouse. *Krasnoyarsk Science*. 2020;9(3–4):51–55. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=44447317>.
13. Volgin V. V. *Spare parts: peculiarities of marketing and management*. Moscow: Os'; 1997. (In Russ.)
14. Ryakhovskiy A. A. Features of organization of marketing activity of car service enterprises. In: *Rossiia na poroge XXI veka*. Moscow: MSU; 2002. (In Russ.)
15. Makarova A. N., Zakharov N. S. *Adjustment of maintenance periodicity norms taking into account actual conditions and intensity of vehicle operation*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2019. (In Russ.) URL: <https://www.iprbookshop.ru/epd-reader?publicationId=101413>.
16. Zakharov N. S. *Influence of seasonal conditions on the processes of quality change in automobiles: abstract of the dissertation for the degree of doctor of technical sciences*. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2000. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=22855792>.
17. Guselnikov A. S., Zakharov N. S. Influence of seasonal conditions on the failure rate parameter of elements of the KAMAZ-43118 engine power supply system. *Intellect. Innovations. Investments*. 2023;(2):111–120. (In Russ.) <https://doi.org/10.25198/2077-7175-2023-2-111>
18. Elyashevich I. P. Harmonic analysis in inventory management in logistics and supply chains. *Moscow University Economics Bulletin*. 2023;(4):223–246. (In Russ.) <https://doi.org/10.55959/MSU0130-0105-6-58-4-10>
19. Zakharov N. S., Sapozhenkov N. O., Panfilov A. A., Petrov V. S., Rakitin V. A. The influence of electrical equipment power on the level of charge of car batteries. *Scientific and Technical Volga Region Bulletin*. 2022;(2):34–37. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/gknjib>.



Информация об авторах

Ишкин Юрий Дмитриевич, аспирант кафедры эксплуатации автомобильного транспорта, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, yrtmn@outlook.com

Захаров Николай Степанович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сервиса автомобилей и технологических машин, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, zaharovns@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8415-0505>

Рассохин Александр Викторович, инженер, ООО ТюменьАвтоЛуч, Тюмень, Российская Федерация, ra_rus@mail.ru

Ишкина Елена Геннадьевна, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры технологии машиностроения, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, ishkinaeg@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8354-9415>

Information about the authors

Yuri D. Ishkin, Postgraduate in the Department of Road Transport Operation, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, yrtmn@outlook.com

Nikolay S. Zakharov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of the Department of Automotive Service and Technological Machinery, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, zaharovns@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8415-0505>

Alexander V. Rassokhin, Engineer in LLC "TyumenAutoLuch", Tyumen, Russian Federation, ra_rus@mail.ru

Elena G. Ishkina, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Mechanical Engineering Technology, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, ishkinaeg@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8354-9415>

Получена 31 января 2025 г., одобрена 20 февраля 2025 г., принята к публикации 25 февраля 2025 г.
Received 31 January 2025, Approved 20 February 2025, Accepted for publication 25 February 2025

Научная статья / Original research article

УДК 656.11

<https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-112-124>

EDN: SRODRH

2.9.5 Эксплуатация автомобильного транспорта (технические науки)

2.1.8 Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов, мостов и транспортных тоннелей (технические науки)



Анализ действующих методик по определению потоков насыщения на городских регулируемых пересечениях

Р. В. Андронов , Е. Э. Леверенц, Д. А. Гензе, Е. Н. Легостаева, В. С. Мотелика

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

 andronovrv@tyuiu.ru



Аннотация. В процессе обновления нормативной документации в Российской Федерации устанавливается система национальных и переходных национальных стандартов (ГОСТ, ПНСТ), готовятся к отмене такие формы документации, как СП, ОДМ и др. Согласно федеральному законодательству, в нормативных документах не должно быть дублирующих положений. В настоящее время при расчете потока насыщения и пропускной способности на регулируемых пересечениях используются две оформленные в виде дорожных нормативов методики, основанные на результатах отечественных исследований и стандартах Highway Capacity Manual, принятых в США. Цель статьи – провести анализ применяемых методик по расчету потока насыщения и средней задержки одного автомобиля, а также сравнительный анализ расчетных значений потока насыщения по представленным документам на примере регулируемых пересечений. При общем сходстве величин транспортных задержек, рассчитанных на пересечениях с коэффициентом загрузки до 1 (расхождение в расчетах находятся в пределах 10 %), выявлено отличие в значениях, полученных по методике Вебстера, и методике, базирующейся на нормах Highway Capacity Manual, при уровне загрузки равном и превышающем 1. Некорректное применение указанных коэффициентов имеет накопительный характер и влияет на общую точность расчетов. Необходимо принятие единого национального стандарта по расчету потока насыщения и пропускной способности, учитывающее наработки как отечественных, так и зарубежных исследований.

Ключевые слова: поток насыщения, пропускная способность, задержки транспортных средств, улично-дорожная сеть, транспортный поток, регулируемые пересечения

Для цитирования: Андронов Р. В., Леверенц Е. Э., Гензе Д. А., Легостаева Е. Н., Мотелика В. С. Анализ действующих методик по определению потоков насыщения на городских регулируемых пересечениях. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(1):112–124. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-112-124> EDN: SRODRH

Analysis of current methods for determining saturation flows at urban controlled intersections

Roman V. Andronov , Evgeny E. Leverents, Dmitriy A. Genze, Elena N. Legostaeva, Victoria S. Motelika

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

 andronovrv@tyuiu.ru



Abstract. The process of updating regulatory documentation in the Russian Federation involves the implementation of a system of national and transitional national standards (GOST, PNST), and the phasing

out of such forms of documentation as SP, ODM, etc. According to federal law, regulatory documents must not contain duplicative provisions. Currently, two standardized methodologies, based on domestic research findings and the Highway Capacity Manual standards adopted in the USA, are used to calculate saturation flow and traffic capacity at controlled intersections. These methodologies are formalized as industry road standards. The purpose of this article is to analyze the existing methodologies for calculating the saturation flow and the average delay per vehicle, as well as to compare the calculated saturation flow values from the presented documents using the example of regulated intersections. While the values of transport delays at intersections with a load factor below 1 are generally similar (calculation discrepancies are within 10%), a difference was found between the values obtained using Webster's method and the method based on the Highway Capacity Manual when the load factor is equal to or exceeds 1. The incorrect application of these coefficients has a cumulative effect and affects the overall accuracy of calculations. Therefore, it is necessary to adopt a unified national standard for calculating saturation flow and traffic capacity, taking into account the findings of both domestic and international research.

Keywords: saturation flow, traffic capacity, vehicle delay, road network, traffic flow, controlled intersections

For citation: Andronov R. V., Leverents E. E., Genze D. A., Legostaeva E. N., Motelika V. S. Analysis of modern methods for determining saturation flows at urban controlled intersections. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(1):112–124. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-1-112-124>



1. Введение / Introduction

В процессе обновления нормативной документации в РФ устанавливается система национальных и переходных национальных стандартов, являющихся обязательными к исполнению. В соответствии со ст. 35 закона «О стандартизации в Российской Федерации»¹ (в редакции 30.12.2020 г.), с 1 сентября 2025 г. все нормативные документы, которые отсутствуют в ст. 14 данного закона, в том числе ОДН, ОДМ, СП, будут отменены и запрещены к применению и упоминанию «при осуществлении закупок товаров, работ, услуг для обеспечения государственных и муниципальных нужд, закупок товаров, работ, услуг организациями с участием государства». Использование ссылок на такие стандарты в нормативных правовых актах, конструкторской, проектной и иной технической документации также будет запрещено. Исключение составляют национальные и переходные национальные стандарты (ГОСТ, ПНСТ). Также, согласно ст. 4 данного закона, в различных нормативных документах не должно быть дублирующих положений. Вновь разрабатываемые нормативные документы в собственных расчетных методиках должны ссылаться на соответствующие ранее принятые. Проблема обновления и унификации нормативной документации характерна не только для транспортной и дорожной отрасли, но и для строительной отрасли в целом, что отмечалось в ряде исследований, в частности в [1].

В соответствии со стандартами последних лет (ГОСТ Р 56670-2015² и ГОСТ Р 58653-2019³), для мониторинга движения транспортных потоков, определения конфигурации и параметров пере-

¹ Федеральный закон от 19.06.2015 г. № 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» (с изменениями на 30.12.2020 г.). URL: <https://docs.cntd.ru/document/420284277>.

² ГОСТ Р 56670-2015. Интеллектуальные транспортные системы. Подсистема мониторинга параметров транспортных потоков на основе анализа телематических данных городского пассажирского транспорта = Intellectual transportation system. Traffic parameters monitoring using telematics data of urban passengers transport vehicles. Дата введения 2016-05-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200125977> (дата обращения: 11.04.2024).

³ ГОСТ Р 58653-2019. Дороги автомобильные общего пользования. Пересечения и примыкания. Технические требования = Automobile roads of general use. Intersections and junctions. Technical requirements. Дата введения 2020-03-01. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200169423> (дата обращения: 20.04.2024).

сечений, а также организации дорожного движения по ним, необходимо знать рассчитанное значение потока насыщения и пропускной способности регулируемых пересечений. Данный вопрос не рассмотрен в упомянутых документах, и для расчета пока используются ОДМ 218.6.003-2011⁴ и ОДМ 218.2.020-2012⁵. Положения закона «О стандартизации в Российской Федерации» выводят упомянутые документы за рамки правового поля и грозят будущим отсутствием актуальной и релевантной методики расчета показателей потока насыщения и пропускной способности.

Представленные нормы не являются статичными, и в настоящее время исследователи ведут значительную работу по совершенствованию данных подходов с учетом российских и региональных особенностей [2–4] с целью организации дорожного движения с применением автоматизированной системы управления движением [5, 6].

Цель статьи – проведение сравнительного анализа применяемых методик по расчету потока насыщения и средней задержки одного автомобиля посредством натурного эксперимента. Для достижения поставленной цели необходимо провести сравнение расчетных значений параметров транспортного потока на регулируемых пересечениях по представленным документам. Новизна исследования заключается в том, что впервые установлен факт дублирования используемых рекомендаций в области применения некоторых расчетов параметров транспортного потока.

Как было отмечено выше, при расчете вышеуказанных характеристик руководствуются ОДМ 218.6.003-2011 и ОДМ 218.2.020-2012. В дополнение ко второму документу в 2017 г. Министерство транспорта РФ выпустило Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения⁶, которые в целом повторяют положения ОДМ 218.2.020-2012.

ОДМ 218.6.003-2011 базируются в основном на исследованиях отечественных ученых [7], а ОДМ 218.2.020-2012 и дополняющие их рекомендации основываются на серии американских стандартов Highway Capacity Manual (2000, 2010, 2016 гг.)^{7, 8} (далее – HCM) и отражают большой пласт зарубежных исследований теории транспортных потоков [8], на русском языке они известны по работам [2, 9, 10].

Современные исследования в части потока насыщения и пропускной способности делают акцент на изыскании резервов пропускной способности в условиях движения плотных транспортных потоков и наличия заторов [11, 12, 13] и оптимизации светофорного цикла с повышением пропускной способности конфликтных поворачивающих направлений [11, 16]. Отдельное внимание следует уделить исследованию [3], базирующемуся на нормах Highway Capacity Manual, в котором корректировку пропускной способности проводят на основании погодных условий с использованием методов нечеткой логики.

⁴ ОДМ 218.6.003-2011 Методические рекомендации по проектированию светофорных объектов на автомобильных дорогах. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200098292> (дата обращения: 11.04.2024).

⁵ ОДМ 218.2.020-2012 Методические рекомендации по оценке пропускной способности автомобильных дорог. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200092512> (дата обращения: 04.04.2024).

⁶ Приказ Министерства транспорта Российской Федерации от 26.12.2018 г. № 479 «Об утверждении методических рекомендаций по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения в части расчета значений основных параметров дорожного движения». URL: <https://docs.cntd.ru/document/552196818> (дата обращения: 04.04.2024).

⁷ Highway Capacity Manual 2010 by National Academy of Sciences. URL: <https://archive.org/details/highway-capacity-manual-2010> (accessed 04.04.2024).

⁸ Highway Capacity Manual 7th Edition. A Guide for Multimodal Mobility Analysis (2022). URL: <https://doi.org/10.17226/26432> (accessed 11.04.2024).

Существующие методики расчета задержек транспортных средств разделились на две ветви, одну из них можно назвать методикой Вебстера [7, 16], вторая базируется на нормах HCM и представлена в нормативной документации по регулируемым пересечениям (ГОСТ Р 58653-2019, Методических рекомендациях по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения). Несмотря на то, что вторая методика вошла в государственный стандарт, до сих пор при расчетах и в технических заданиях проектов по организации дорожного движения требуется учитывать положения ОДМ 218.6.003-2011.

2. Материалы и методы / Materials and methods

Гипотеза, которая легла в основу исследования, заключается в том, что современная транспортная ситуация требует совершенствования методов оценки параметров транспортных потоков на пересечениях, что вызвано изменением режима работы элементов улично-дорожной сети, в частности, транспортных пересечений.

Объектом исследования являлся процесс движения транспортных потоков на регулируемых пересечениях городских улиц и дорог. В исследовании использовались методы расчета потока насыщения, пропускной способности и задержек транспортных средств, а также такие общенаучные методы, как наблюдение, анализ, системный подход. Данное исследование является теоретическим, базой для всех расчетных выкладок и выводов являлись фундаментальные положения теории транспортных потоков [7, 17].

Для сравнения методов был проведен расчет характеристик транспортного потока на регулируемых пересечениях с различными уровнями загрузки по формуле Вебстера и по методике HCM.

В настоящей статье не ставилась цель практического подтверждения теоретических положений рассматриваемых документов (ОДМ 218.6.003-2011, ОДМ 218.2.020-2012 и Методических рекомендаций по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения) и осуществлялось только сравнение расчетных методик.

Сравнение проводилось только по расчетным параметрам, т. к. существуют значительные трудности измерить поток насыщения в натурных условиях и в связи с низкой потенциальной достоверностью такого эксперимента (это объясняется эпизодическим характером заторов, влиянием на характер очереди пропускной способности соседнего пересечения). Сравнение фактических значений потока насыщения не входило в задачу данной статьи ввиду достаточной изученности данного вопроса и множества влияющих факторов, поэтому вывод о применимости методик делался на сходстве/различии полученных теоретических результатов по исследуемым методикам.

3. Результаты и обсуждение / Results and discussion

Особенностью отечественных нормативных документов является то, что ОДМ 218.2.020-2012 применяются в основном в области проектирования конфигурации проезжей части и организации движения, а ОДМ 218.6.003-2011 используются преимущественно с целью назначения и расчета светофорной сигнализации. В плане расчета потока насыщения и пропускной способности регулируемых пересечений данные документы дублируют друг друга.

Таким образом, согласно положениям федерального закона и ввиду отмены действия данных документов, необходимо разработать единый документ по расчету потока насыщения и пропускной способности, учитывающий российские особенности движения по городским улицам и дорогам. Далее в статье будут показаны некоторые методологические отличия обоих документов.

Под *пропускной способностью* (*Capacity*) подразумевается максимальное число автомобилей, которое может пропустить участок дороги за единицу времени в одном или двух направлениях в рассматриваемых дорожных и погодноклиматических условиях (согласно ОДМ 218.2.020-2012).

Поток насыщения (Saturation Flow) – это максимально возможная интенсивность движения по полосе, с которой транспортные средства, ранее стоявшие в очереди, могут проехать перекресток в текущих условиях при условии зеленого сигнала без потерь времени (перевод из Highway Capacity Manual). В [2] данное определение приведено в сокращенном виде: «поток насыщения – это максимальная интенсивность разъезда транспортных средств из очереди в течение зеленого сигнала». В Методических рекомендациях по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения дано упрощенное определение: «поток насыщения – установившаяся интенсивность движения через стоп-линию из очереди большой длины».

При регулировании очередности проезда потоков разных направлений фазы движения и их продолжительность подбираются таким образом, чтобы обеспечивать максимальную пропускную способность пересечений автомобильных дорог, согласно ОДМ 218.2.020-2012. Таким образом, пропускная способность является производным параметром от потока насыщения. Расчетное значение потока насыщения S группы полос в конкретных дорожных условиях определяется по формуле:

$$S = S_0 \cdot N \cdot f_W \cdot f_{HV} \cdot f_g \cdot f_p \cdot f_{bb} \cdot f_a \cdot f_{LU} \cdot f_{LT} \cdot f_{RT} \cdot f_{Lpb} \cdot f_{Rpb'} \quad (1)$$

где S_0 – идеальный поток насыщения, прив. авт./ч (по умолчанию 1 900);

N – количество полос движения в составе группы;

f_W – коэффициент, учитывающий ширину полосы движения;

f_{HV} – коэффициент, учитывающий долю грузовых автомобилей в потоке;

f_g – коэффициент, учитывающий продольные уклоны;

f_p – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые паркующимися транспортными средствами;

f_{bb} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые автобусами;

f_a – коэффициент, учитывающий тип территории;

f_{LU} – коэффициент, учитывающий неравномерность загрузки полос движения;

f_{LT} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые поворачивающими налево транспортными средствами в составе группы;

f_{RT} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые поворачивающими направо транспортными средствами в составе группы;

f_{Lpb} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые пешеходами при повороте налево;

f_{Rpb} – коэффициент, учитывающий помехи, создаваемые пешеходами при повороте направо.

Приведенная формула практически идентична формуле, изложенной в ОДМ 218.2.020-2012, в которой коэффициент грузовых автомобилей в потоке не учтен. В городских условиях, где участие грузовых автомобилей и общественного транспорта оказывает влияние на поток движения, это не корректно и расчет потока насыщения требует его учета.

При дальнейшем анализе ОДМ 218.2.020-2012 и Методических рекомендаций по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения было выявлено отличие применяемых диаграмм для оценки коэффициента, влияющего на снижение показателя потока насыщения при левоповоротном движении при одинаковых условиях применения и при полной идентичности положений в части расчета потока насыщения (рис. 1).

Расчет показателя потока насыщения по ОДМ 218.6.003-2011 является известной задачей, и формула расчета в настоящей статье не приводится.

Регулируемые пересечения являются так называемыми узкими местами улично-дорожной сети, и пропускная способность улиц в целом будет обуславливаться пропускной способностью регулируемых пересечений [17, 18]. В данном исследовании были рассмотрены регулируемые пересечения ул. Герцена – ул. Первомайской и ул. Полевой – ул. Ямской в г. Тюмени. Первый узел, согласно данным сайта Госавтоинспекции Тюменской области, на втором месте по показателю аварийности.

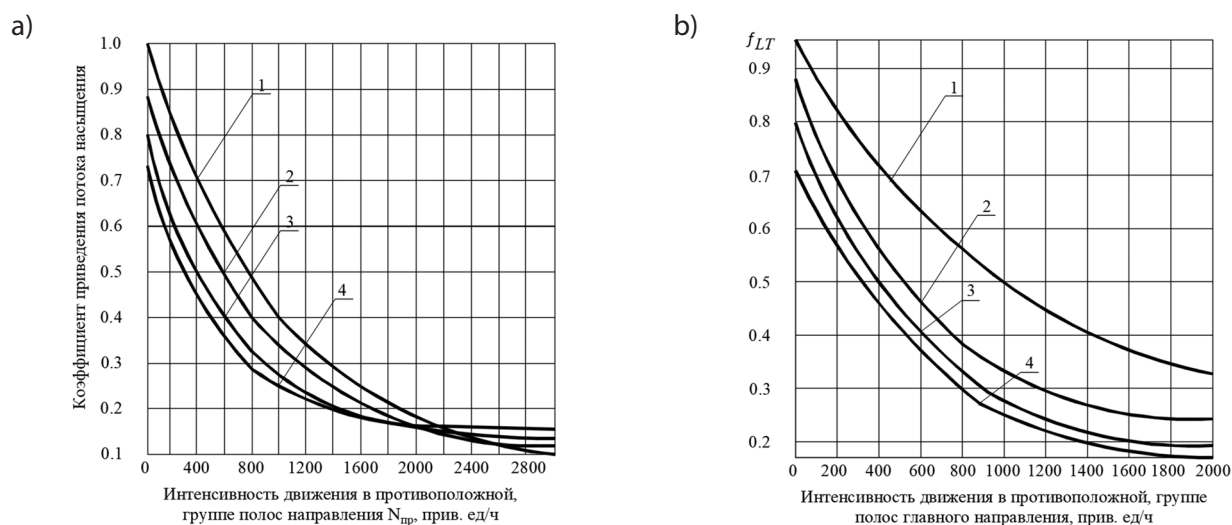


Рис. 1. Отличие применяемых графиков в документах: а) ОДМ 218.2.020-2012; б) Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения, 2017 г.

Fig. 1. Difference in the charts used in the documents: а) ODM 218.2.020-2012; б) Methodological recommendations for the development and implementation of traffic management measures, 2017

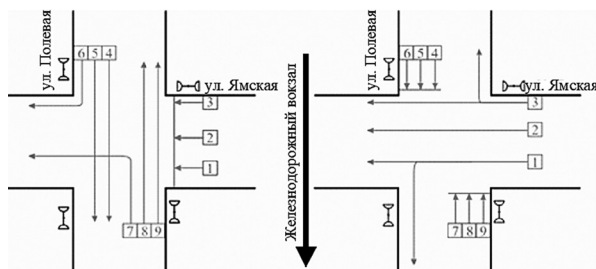


Рис. 2. Организация движения транспорта на пересечении ул. Ямской – Полевой

Fig. 2. Traffic management at the intersection of Yamskaya Street and Polevaya Street

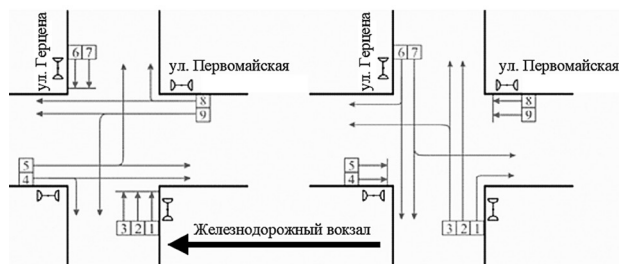


Рис. 3. Организация движения транспорта на пересечении ул. Герцена – Первомайской

Fig. 3. Traffic management at the intersection of Herzen Street and Pervomayskaya Street

Данные перекрестки оснащены необходимыми техсредствами регулирования движения. Схемы организации движения по пересечениям по состоянию на май 2024 г. представлены на рис. 2, 3.

Определение коэффициентов приведения к легковому автомобилю ввиду перехода от грузоподъемности автомобиля к количеству осей движения у транспортного средства⁹ является достаточно нетривиальной задачей для применяемых методик (предлагаемых ОДМ 218.6.003-2011 и Методическими рекомендациями по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения). Так как общее количество грузовых автомобилей и автобусов в транспортном потоке на рассматриваемых узлах не превышает 5 %, то для простоты анализа сравнение проводилось в физических единицах.

Расчет значения коэффициентов, учитывающих влияние левоповоротного движения с конфликтом, производился для светофорного цикла и интенсивности движения в будний день с 17.00 до 18.00 (2 мая 2024 г.).

⁹ ГОСТ 32965-2014 Методы учета интенсивности движения транспортного потока = Public roads. Traffic flow intensity accounting methods. Дата введения 08.09.2016. Москва: Стандартинформ, 2016. 26 с.

Таблица 1. Сравнение результатов расчета согласно Методическим рекомендациям по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения и ОДМ 218.6.003-2011
Table 1. Comparison of calculation results using the Methodological recommendations for the development and implementation of traffic management measures and ODM 218.6.003-2011

Пересечение	Номер полосы (рис. 2 и 3)	Итоговое значение потока насыщения согласно Методическим рекомендациям по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения			Итоговое значение потока насыщения согласно ОДМ 218.6.003-2011	Относительное отклонение полученных значений по колонкам, %		
		$f_a = 0.9;$ $f_{LU} = 0.95;$ (для полос 4, 5, 8, 9)	$f_a = 1.0;$ $f_{LU} = 0.95;$ (для полос 4, 5, 8, 9)	$f_a = 1.0;$ $f_{LU} = 1.0;$		3 и 6	4 и 6	5 и 6
Ул. Ямская – Полевая	1	1 560	1 733	1 733	1 663	6	4	4
	2	1 596	1 773	1 773	1 850	14	4	4
	3	1 580	1 756	1 756	1 762	10	0	0
	4	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
	5	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
	6	1 324	1 471	1 471	1 480	11	6	1
	7	882	980	980	1 057	17	7	7
	8	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
	9	1 480	1 645	1 731	1 850	20	11	6
Среднее отклонение, %						15	7	5
Ул. Герцена – Первомайская	1	1 386	1 540	1 540	1 480	6	4	4
	2	1 630	1 811	1 811	1 850	12	2	2
	3	1 016	1 129	1 129	1 057	4	7	7
	4	1 609	1 787	1 787	1 786	10	0	0
	5	1 208	1 342	1 342	1 324	9	1	1
	6	1 607	1 786	1 786	1 745	8	2	2
	7	1 197	1 330	1 330	1 396	14	5	5
	8	1 537	1 708	1 708	1 805	15	5	5
	9	1 114	1 238	1 238	1 345	17	8	8
Среднее отклонение, %						11	4	4

Итоговые значения потока насыщения, полученные согласно Методическим рекомендациям по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения, представлены в таблице 1.

Можно предположить, что при неоднородном составе транспортного потока разница в расчете потока насыщения по представленным методикам была бы наибольшей.

Отдельно заслуживают внимания коэффициенты f_a – тип территории (равен 0) и f_{LU} – неравномерность загрузки полос движения (f_T и f_H соответственно, согласно ОДМ 218.2.020-2012), описывающие общую ситуацию с дорожными условиями на данном узле. Так как оба рассматриваемых пересечения расположены в центральной части города, то рекомендуемое значение коэффициента f_a составляет 0.9, а значение коэффициента f_{LU} для групп полос с одинаковым направлением движения – 0.95.

Результаты расчетов по двум документам были достаточно схожими, несмотря на то, что ОДМ 218.6.003-2011 в целом не предусматривает разделение движения на конфликтное и бесконфликтное.

Итоговое сравнение показало схожие результаты расчета. Отклонение составило в целом 4–5 %. Большие значения отклонений (11–15 %) фиксируются при недостаточно обоснованном, на взгляд авторов, применении коэффициента, учитывающего тип территории. При очевидном влиянии способа пропуска (конфликтного/бесконфликтного) левоповоротного потока методика ОДМ 218.6.003-2011 является достаточно простой, и результаты расчета по ней не отличаются от результатов, полученных согласно ОДМ 218.2.020-2012 и Методическим рекомендациям по разработке и

реализации мероприятий по организации дорожного движения. Это обусловлено тем, что при планировании организации движения и при подходе, где безопасность дорожного движения зависит в первую очередь от качества дороги, значительные левоповоротные потоки выделяют полностью (отдельная фаза) или частично (ранняя отсечка и т. д.) в бесконфликтное состояние.

На следующем этапе проводилось сравнение расчета транспортных задержек t_{cp} по двум методикам.

Первая методика базируется на формуле Вебстера:

$$t_{cp} = \frac{T_u}{2(1-\lambda x)} + \frac{x^2}{2N(1-x)} - 0.65 \left(\frac{T_u}{N^2} \right)^{1/3} \cdot x^{(2+5\lambda)}, \quad (2)$$

где λ – отношение длительности разрешающего сигнала к циклу ($\lambda = T_d/T_u$);

x – степень насыщения направления движения;

N – интенсивность движения транспортных средств в рассматриваемом направлении, авт./с.

Вторая методика – методика HCM [11]. Нормативный документ, используемый на территории Соединенных Штатов Америки, во многих аспектах аналогичен канадским нормативным документам и включает в себя результаты исследований регулируемых пересечений, которые проводились на протяжении 30 лет. Величина средней задержки на один автомобиль d определяется по данной методике следующим образом [11]:

$$d = d_1(PF) + d_2 + d_3, \quad (3)$$

где d_1 – стандартная задержка при равномерном прибытии автомобилей к перекрестку, с/прив. ед.;

PF – коэффициент прогрессии для стандартной задержки с учетом прогрессии регулирования;

d_2 – дополнительная задержка случайного транспортного средства при начальной длине очереди автомобилей равной нулю, с/прив. ед.;

d_3 – задержка автомобилей в начале анализируемого периода, с/прив. ед. (в отечественных нормативных документах (ГОСТ Р 58653-2019, Методические рекомендации по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения) отсутствует).

Стандартная задержка d_1 подразумевает равномерное прибытие автомобилей к пересечению при отсутствии первоначальной очереди. Стандартная задержка не может быть больше 1, так как была основана на методике Вебстера [9]. Величина средней задержки d_1 определяется по формуле:

$$d_1 = \frac{0.5C \left(1 - \frac{g}{C} \right)^2}{1 - \left[\min(1, X) \frac{g}{C} \right]}, \quad (4)$$

где C – длина цикла регулирования, с;

g – эффективное время разрешительного сигнала, с;

X – коэффициент насыщения полосы.

Дополнительная задержка d_2 учитывает случайности в прибытии автомобилей на перекресток и в перенасыщении циклов регулирования. Она является чувствительной к: потоку насыщения X ; длительности периода T , затор определяется на подходе к перекрестку или в момент уменьшения затора; пропускной способности C ; типу светофорного регулирования k .

При расчете дополнительной задержки d_2 предполагается отсутствие очереди в начале анализируемого периода:

$$d_2 = 900T \left[(X-1) + \sqrt{(X-1)^2 + \frac{8kIX}{C_i T}} \right], \quad (5)$$

где C_i – пропускная способность для полос i , прив. ед./ч;

k – коэффициент, учитывающий влияние параметров светофорного оборудования при адаптивном регулировании на величину дополнительной задержки;

l – коэффициент, учитывающий удаленность предыдущего регулируемого перекрестка от рассматриваемого.

Сравнение методов расчета по ряду критериев показано в таблице 2. Оба метода позволяют вычислить величину транспортной задержки для прогноза ситуации на пересечении. Однако современная транспортная ситуация подразумевает частые случаи работы перекрестков в режиме перегрузки, когда поток автомобилей превосходит пропускную способность пересечения. Именно для режима перегрузки расчеты по формуле Вебстера дают неточные результаты [15].

Для проверки влияния перегрузки на результаты расчетов по двум методам было проведено исследование 7 объектов в Тюмени. Различие в полученных значениях представлено на рис. 4. Значительное отличие результатов на пересечении ул. Луначарского и Полевой связано с высоким коэффициентом загрузки на обоих пересекающихся направлениях.

Результаты расчетов транспортной задержки на пересечениях по двум методикам приведены в таблице 3. Различие значений увеличивалось в зависимости от коэффициента загрузки (чем выше коэффициент загрузки, тем больше отличие).

Таблица 2. Сравнение методов расчета по выбранным критериям

Table 2. Comparison of calculation methods based on selected criteria

Критерий	Метод Вебстера	Метод HCM 2000
Подход	Эмпирический, упрощенный расчет задержки	Комплексный, с учетом трех компонентов задержки
Учет перегрузки	Не учитывается	Учитывается
Сложность расчетов	Относительно простой	Сложный, учитывает больше параметров
Применение	Подходит для изолированных пересечений и пересечений, работающих без координации	Подходит для любого типа организации дорожного движения
Точность	Не работает при перегрузке	Высокая при различных условиях

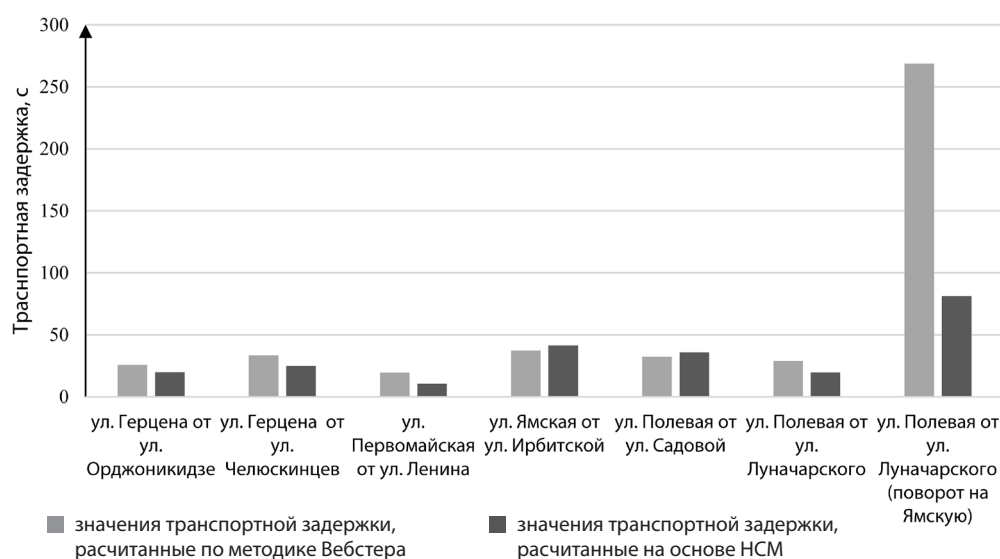


Рис. 4. Расчет транспортной задержки по двум методам

Fig. 4. Calculation of traffic delay using two methods

Таблица 3. Различие методов по оценке величины транспортной задержки
Table 3. Differences in methods for estimating traffic delay

Улица, направление	Коэффициент загрузки K_s	Величина транспортной задержки по методике Вебстера, с	Величина транспортной задержки на основе HCM, с	Отличие расчетов, %
Ул. Герцена от ул. Орджоникидзе	0.27	26	20	30
Ул. Герцена от ул. Челюскинцев	0.36	33	25	34
Ул. Первомайская от ул. Ленина	0.18	19	11	85
Ул. Ямская от ул. Ирбитской	0.7	37	41	10
Ул. Полевая от ул. Садовой	0.45	32	36	10
Ул. Полевая от ул. Луначарского	0.7	29	20	47
Ул. Полевая от ул. Луначарского (поворот на ул. Ямскую)	0.98	269	82	231

Значения, полученные по методике HCM и закрепленные в ГОСТ, являются более релевантными при оценке транспортной ситуации и в целом схожи с полученными при имитационном моделировании результатами. Такие значения характерны для уровня загрузки меньше единицы. При уровне загрузки больше единицы формула Вебстера показывает неточные результаты и отличие двух методов достигает 85 %, так как среднее значение задержки, рассчитанной по формуле Вебстера, стремится к бесконечности [15]. Как видно на рис. 5, при коэффициенте загрузки близкому или превосходящему 1 значения, рассчитанные по методике Вебстера, стремятся к бесконечности, что не соответствует фактическим условиям движения [15].

При синхронизации работы соседних пересечений и наличии так называемой прогрессии (синхронный подход транспортных средств на зеленый сигнал светофора) вторая методика будет выдавать более корректные значения. Метод Вебстера также не учитывает перегрузку, поэтому при корректной работе на уровнях загрузки ниже 1 оценка транспортной задержки имеет приемлемую точность. Но при высоких уровнях загрузки и при перегруженном пересечении расчет может дать некорректные результаты.

Методика расчета средней задержки, базирующаяся на нормах HCM, учитывает условия перегрузки транспортного пересечения. Таким образом, при работе с пересечениями, для которых характерны пиковые значения интенсивности движения с превышением их пропускной способности, наиболее корректный расчет сможет дать методика HCM.

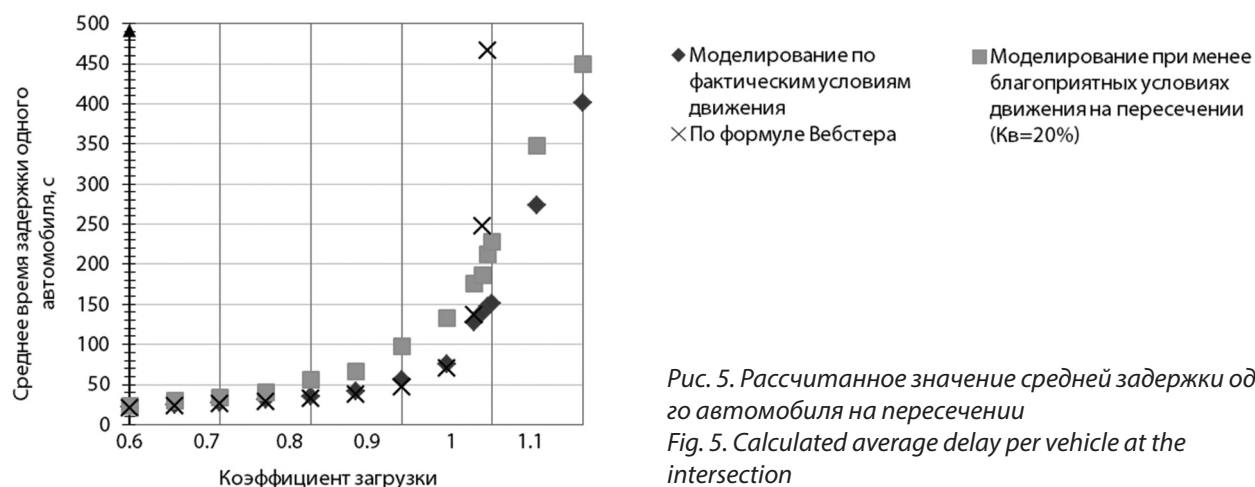


Рис. 5. Рассчитанное значение средней задержки одного автомобиля на пересечении
Fig. 5. Calculated average delay per vehicle at the intersection

4. Заключение / Conclusions

Проведенный анализ применяемых методик по расчету потока насыщения и средней задержки одного автомобиля, а также расчетных значений потока насыщения позволил сделать следующие выводы:

1. Расчеты потока насыщения по методикам, предлагаемым ОДМ 218.6.003-2011 и Методическими рекомендациями по разработке и реализации мероприятий по организации дорожного движения, показали схожие значения, отклонение составило 4–15 %.
2. Изложенная в ОДМ 218.6.003-2011 методика для определения потока насыщения на регулируемых пересечениях является более доступной (необходимы значения потока насыщения и пропускной способности) и удобной для моделирования больших сетей с использованием автоматизированной системы управления дорожного движения. В свою очередь для расчета по Highway Capacity Manual требуется большее количество параметров пересечения. Если при планировании организации движения левоповоротные потоки выделить полностью (отдельная фаза) или частично (ранняя отсечка и др.) в бесконфликтное состояние, различие в результатах расчета будет незначительным (4–5 %).

Таким образом, наиболее популярную и часто применяемую в отечественной практике методику Вебстера для расчета задержек имеет смысл заменить на методику HCM, приведенную в ГОСТ Р 58653-2019, либо другую, актуализированную для российских условий, без дублирования положений документов и «неопределенности» по условиям применения. Кроме того, необходимо принятие в рамках единого подхода национального стандарта по расчету потока насыщения пропускной способности и задержек транспортных средств, учитывающего наработки как отечественных, так и зарубежных исследований.



Вклад авторов. Андронов Р. В. – формулировка концепции исследования; разработка методологического подхода; подготовка исходного текста; обобщение итоговых результатов. Леверенц Е. Э. – проведение эксперимента; подготовка исходного текста; редактирование и доработка текста. Гензе Д. А. – анализ текущего состояния проблемы; совершенствование методологической базы. Легостаева Е. Н. – проектирование программы испытаний; проведение эксперимента. Мотелика В. С. – исследование актуального состояния вопроса; редактирование и доработка текста.

Author contributions. Roman V. Andronov – formulation of the research concept; development of the methodological approach; preparation of the initial draft; summarization of the final results. Evgeny E. Leverents – conducting the experiment; preparation of the initial draft; editing and refinement of the text. Dmitry A. Genze – analysis of the current state of the problem; refinement of the methodological framework. Elena N. Legostaeva – design of the testing program; conducting the experiment. Victoria S. Motelika – investigation of the current state of the issue; editing and refinement of the text.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

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

Список литературы

1. Овчинников И. Г., Овчинников И. И., Жанадиев Б. Б., Кудайберген Н. Б. Проблемы применения современных нормативных документов для расчета транспортных сооружений. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(1):116–122. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-116-122>
2. Левашев А. Г., Михайлов А. Ю. Состояние методов расчета регулируемых пересечений. *Вестник Иркутского государственного технического университета*. 2003;(3-4):71–76. Режим доступа: https://journals.istu.edu/vestnik_irtu/journals/2003/3_4.
3. Боровской А. Е., Шевцова А. Г. Методы определения потока насыщения автотрассы. *Мир транспорта*. 2013;(3):44–51. URL: <https://mirtr.elpub.ru/jour/article/view/376>.
4. Лихачев Д. В., Дорохин С. В. Исследование процесса ввода специализированной лево-поворотной фазы регулирования. *Мир транспорта и технологических машин*. 2018;(2):40–47. URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35384490_12001931.pdf.

5. Морозов В. В. Решение проблемы образования транспортных заторов путем использования АСУДД в г. Тюмень. В сб.: *Нефть и газ Западной Сибири: Материалы Международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию со дня рождения Косухина Анатолия Николаевича, Тюмень, 15–16 октября 2015 г.* Тюмень: Тюменский государственный нефтегазовый университет; 2015. Т. III. С. 257–262.
6. Баните А. В., Деряга Д. С., Леоненко О. В. Совершенствование городской транспортной системы путем внедрения адаптивных систем управления дорожным движением. *Автоматика на транспорте*. 2021;7(4):565–583. URL: <https://atjournal.ru/ru/nauka/issue/5099/view#issue-rubrics>.
7. Кременец Ю. А., Печерский М. П., Афанасьев М. Б. *Технические средства организации дорожного движения*. Москва: Академкнига; 2005. 279 с. URL: <https://djvu.online/file/eoke6HJUnFkdJ>.
8. *National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington DC: The National Academies Press; 2022. <https://doi.org/10.17226/26432>
9. Цариков А. А. Развитие методов расчета регулируемых узлов на улично-дорожной сети. *Вестник Уральского государственного университета путей сообщения*. 2009;(3–4):118–123. URL: https://www.usurt.ru/vestnik/archiv/002_1_20_3_1.pdf.
10. Власов А. А. *Теория транспортных потоков*. Пенза: Пензенский государственный университет архитектуры и строительства; 2014. 123 с.
11. Pan Jia-Xiu, Xue Yu, Liang Yu-Juan, Tang Tie-Qiao. Effect of road structure on the capacity of a signalized road intersection. *Chinese Physics B*. 2009;18(10):4169–4176. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/18/10/016>
12. Hongqiang Li, Dianhai Wang, Zhaowei Qu. Research on the optimal method of cycle length for signalized intersection. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*. 2004. P. 371–376. [https://doi.org/10.1061/40730\(144\)70](https://doi.org/10.1061/40730(144)70)
13. Shepelev V., Glushkov A., Gritsenko A., Gritsenko A., Nevolin D. Vorobyev A. Assessing the traffic capacity of urban road intersections. *Frontiers in Built Environment*. 2022;8:968846. <https://doi.org/10.3389/fbuil.2022.968846>
14. Дрю Д. *Теория транспортных потоков и управление ими*. Москва: Транспорт; 1972. 424 с.
15. Андронов Р. В., Леверентц Е. Э. Расчет методом Монте-Карло задержек транспортных средств на изолированном регулируемом пересечении при его работе на высоких уровнях загрузки. *Вестник гражданских инженеров*. 2017;(1):221–226. URL: <https://vestnik.spgbasu.ru/article/raschet-metodom-monte-karlo-zaderzhkek-transportnyh-sredstv-na-izolirovannom-reguliruemom>.
16. Сильянов В. В. *Теория транспортных потоков в проектировании дорог и организации движения*. Москва: Транспорт; 1977. 303 с.
17. Морозов Г. Н., Морозов В. В., Фадюшин А. А., Мерданов Ш. М. Влияние остаточной автотранспортной очереди на процесс движения автомобилей на городских регулируемых пересечениях. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2024;(1):89–97. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-89-97>
18. Морозов В. В. Повышение эффективности организации дорожного движения методом отнесенного левого поворота. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2023;(3):72–80. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-3-72-80>

References

1. Ovchinnikov I. G., Ovchinnikov I. I., Zhanaliev B. B., Kudaibergenov N. B. Issues of application of modern regulatory documents for the calculation of transportation structures. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(1):116–122. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-116-122>
2. Levashev A. G., Mikhaylov A. Yu. Status of methods for calculating regulated intersections. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = iPolytech Journal*. 2003;(3-4):71–76. (In Russ.) URL: https://journals.istu.edu/vestnik_irtgu/journals/2003/3_4.
3. Borovskoy A. E., Shevtsova A. G. Methods of determination of saturation flow of a motor way. *World of Transport and Transportation*. 2013;(3):44–51. (In Russ.) URL: <https://mirr.elpub.ru/jour/article/view/376>.
4. Likhachev D. V., Dorokhin S. V. Investigation of the process of the introduction of a specialized left-turning phase of regulation. *The world of transport and technological machinery*. 2018;(2):40–47. (In Russ.) URL: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_35384490_12001931.pdf.
5. Morozov V. V. Solving the problem of traffic congestion by using ASUDD in the city of Tumen. In: *Neft' i gaz Zapadnoy Sibiri: Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii, posvyashchennoy 90-letiyu so dnya rozhdeniya Kosukhina Anatoliya Nikolayevicha, Tyumen, October 15–16, 2015*. Tyumen: Tyumen State Oil and Gas University; 2015. Vol. III. P. 257–262.
6. Banite A. V., Deriaga D. S., Leonenko O. V. Improvement of the urban transportation system by the introduction of adaptive traffic control systems. *Automation on Transport*. 2021;7(4):565–583. (In Russ.) URL: <https://atjournal.ru/ru/nauka/issue/5099/view#issue-rubrics>.
7. Kremenets Yu. A., Pecherskiy M. P., Afanas'yev M. B. *Technical means of road traffic organization*. Moscow: Akademkniga; 2005. (In Russ.) URL: <https://djvu.online/file/eoke6HJUnFkdJ>.

8. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Highway Capacity Manual 7th Edition: A Guide for Multimodal Mobility Analysis*. Washington DC: The National Academies Press; 2022. <https://doi.org/10.17226/26432>
9. Tsarikov A. A. The development of calculation methods of regulated junctions on the street network. *Vestnik Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta putey soobshcheniya = Herald of the Ural State University of Railway Transport*. 2009;(3–4):118–123. (In Russ.) URL: https://www.usurt.ru/vestnik/arxiv/002_1_20_3_1.pdf.
10. Vlasov A. A. *Theory of traffic flows*. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2014. (In Russ.)
11. Pan Jia-Xiu, Xue Yu, Liang Yu-Juan, Tang Tie-Qiao. Effect of road structure on the capacity of a signalized road intersection. *Chinese Physics B*. 2009;18(10):4169–4176. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/18/10/016>
12. Hongqiang Li, Dianhai Wang, Zhaowei Qu. Research on the optimal method of cycle length for signalized intersection. In: *Proceedings of the 8th International Conference on Applications of Advanced Technologies in Transportation Engineering*. 2004. P. 371–376. [https://doi.org/10.1061/40730\(144\)70](https://doi.org/10.1061/40730(144)70)
13. Shepelev V., Glushkov A., Gritsenko A., Gritsenko A., Nevolin D. Vorobyev A. Assessing the traffic capacity of urban road intersections. *Frontiers in Built Environment*. 2022;8:968846. <https://doi.org/10.3389/fbuilt.2022.968846>
14. Drew D. R. *Traffic flow theory and control*. New York: McGraw-Hill; 1968.
15. Andronov R. V., Leverenz E. E. Calculation of vehicles' delay at an isolated regulated intersection characterized with a high value of traffic load coefficient using the Monte Carlo technique. *Vestnik Grazhdanskikh Inzhenerov – Bulletin of Civil Engineers*. 2017;(1):221–226. (In Russ.) URL: <https://vestnik.spbgasu.ru/article/raschet-metodom-monte-karlo-zaderzhek-transportnyh-sredstv-na-izolirovannom-reguliruemom>.
16. Silyanov V. V. *Theory of transport flows in road design and traffic organization*. Moscow: Transport; 1977. (In Russ.)
17. Morozov G. N., Morozov V. V., Fadyushin A. A., Merdanov Sh. M. Influence of residual vehicle queue on the process of vehicle traffic at urban regulated intersections. *Architecture, Construction, Transport*. 2024;(1):89–97. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2024-1-89-97>
18. Morozov V. V. Improving the efficiency of traffic organization by the method of the offset left turn. *Architecture, Construction, Transport*. 2023;(3):72–80. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2023-3-72-80>



Информация об авторах

Андронов Роман Валерьевич, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, andronovrv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1418-3587>

Леверенц Евгений Эдуардович, старший преподаватель кафедры строительной механики, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, leverentsee@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6574-8456>

Гензе Дмитрий Александрович, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, genzeda@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4017-7627>

Легостаева Елена Николаевна, ассистент кафедры автомобильных дорог и аэродромов, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, legostaevaen@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2778-7547>

Мотелика Виктория Сергеевна, обучающийся, Тюменский индустриальный университет, Тюмень, Российская Федерация, viktoria.mot@mail.ru

Information about the authors

Roman V. Andronov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, andronovrv@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-1418-3587>

Evgeny E. Leverents, Senior Lecturer in the Department of Structural Mechanics, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, leverentsee@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0001-6574-8456>

Dmitriy A. Genze, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, genzeda@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0009-0007-4017-7627>

Elena N. Legostaeva, Assistant in the Department of Roads and Airfields, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, legostaevaen@tyuiu.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2778-7547>

Victoria S. Motelika, Student, Industrial University of Tyumen, Tyumen, Russian Federation, viktoria.mot@mail.ru

Получена 08 мая 2024 г., одобрена 02 декабря 2024 г., принята к публикации 01 февраля 2025 г.

Received 08 May 2024, Approved 02 December 2024, Accepted for publication 01 February 2025

Подписной индекс журнала "Архитектура, строительство, транспорт"
в объединенном каталоге «Пресса России» 79619 (www.pressa-rf.ru)

