



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 2(49)2026

НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

Издается с 1932 г. под названием «Исследования по теории сооружений»,
с 2009 г. – ВЕСТНИК ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко «Исследования по теории сооружений»,
с 2010 г. – ВЕСТНИК НИЦ «Строительство»
Выходит четыре раза в год

Журнал в «БЕЛОМ СПИСКЕ» научных изданий.

Вестник НИЦ «Строительство» включен в перечень ВАК с 03.10.2019 г. по научным специальностям:

- 2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения;
- 2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения;
- 2.1.5 – Строительные материалы и изделия.

Учредитель и издатель: АО «НИЦ «Строительство»

Адрес: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6
тел.: +7 (495) 602-00-70, доб. 1022/1023
e-mail: vestnikstroy@list.ru

При цитировании ссылка обязательна.
Перепечатка материалов допускается только с письменного разрешения редакции.

Фото на обложке: автор К.В. Шевляков
На фото: П.Д. Арленинов на объекте.
Публикуется с разрешения автора.





**RESEARCH CENTER
OF CONSTRUCTION**
Joint Stock Company

BULLETIN

of Science and Research Center
of Construction

No. 2(49)2026

SCIENTIFIC POTENTIAL OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY

Since 1932, the Journal had been published under the title Studies into the Theory of Constructions;
since 2009 – under the title Bulletin of Kucherenko Scientific and Research Center of Constructions.
Since 2010, the Journal has been published under the title Bulletin of Science and Research Center of Construction
Frequency: Quarterly

The journal is on the "WHITE LIST" of scientific publications.

Since 2019, Bulletin of Science and Research Center of Construction has been included into the List of the Higher Attestation Commission in the following branches of science:

- 2.1.1 – Building constructions, buildings and structures;
- 2.1.2 – Foundations, underground structures;
- 2.1.5 – Building materials and products.

Founder and publisher: JSC Research Center of Construction

Address: 6, 2nd Institutskaya st., Moscow, 109428, Russian Federation
Tel. +7 (495) 602-00-70 add. 1022/1023
E-mail: vestnikstroy@list.ru

When citing a reference is required
Reprinting of materials is allowed only with the written permission of the Journal

Cover photo: K.V. Shevlyakov
On the photo: P.D. Arleninov on the object.
Published with the author's permission.



Главный редактор
ЗВЕЗДОВ Андрей Иванович, д-р техн. наук, профессор

Научный редактор
СМИРНОВА Любовь Николаевна, канд. техн. наук

БАЖЕНОВ Валентин Георгиевич, академик АИН, д-р физ.-мат. наук, профессор НИИМ ННГУ им. Лобачевского, Нижний Новгород, Российская Федерация

БРУШКОВ Анатолий Викторович, д-р геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова», Москва, Российская Федерация

VAL Dimitri V., Dr., Professor
School of the Built Environment, Edinburgh, UK

ВОЛКОВ Андрей Анатольевич, д-р техн. наук, профессор АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

ВЕДЯКОВ Иван Иванович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент РААСН, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

ГУСЕВ Борис Владимирович, д-р техн. наук, профессор, президент Российской инженерной академии (РИА), президент Международной инженерной академии (МИА), член-корреспондент РАН, Москва, Российская Федерация

ДАВИДЮК Алексей Николаевич, д-р техн. наук
ГК «КТБ», Москва, Российская Федерация

КОЛЫБИН Игорь Вячеславович, канд. техн. наук
НИИОСП им. Н.М. Герсеевского
АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

КОНДРАТЬЕВА Лидия Никитовна, д-р техн. наук, профессор
СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

КУЗЕВАНОВ Дмитрий Владимирович, канд. техн. наук
НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

КУРБАЦКИЙ Евгений Николаевич, д-р техн. наук, профессор
РУТ МИИТ, Москва, Российская Федерация

LYAMIN Andrei, Dr., Professor
School of Engineering, Callaghan, Australia

МАИЛЯН Дмитрий Рафаэлович, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

МАНГУШЕВ Рашид Абдуллович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) ГОУ ВПО «СПбГАСУ», Санкт-Петербург, Российская Федерация

МИРСЯЯПОВ Илизар Талгатович, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН) ФГБОУ ВО «КазГАСУ», Казань, Российская Федерация

МОНДРУС Владимир Львович, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Москва, Российская Федерация

МОХОВ Андрей Игоревич, д-р техн. наук, профессор, академик Российской академии естественных наук (РАЕН) Некоммерческое партнерство «Энергоэффект», Москва, Российская Федерация

НЕМЧИНОВ Юрий Иванович, академик АИН, АСУ, д-р техн. наук, профессор
ГП НИИСК, Киев, Украина

НЕСВЕТАЕВ Григорий Васильевич, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «Донской государственный технический университет», Ростов-на-Дону, Российская Федерация

ОБОЗОВ Владимир Иванович, д-р техн. наук, профессор
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

PUZRIN Alexander, Dr., Professor Institute for Geotechnical Engineering, Zurich, Switzerland

ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ Константин Пантелеевич, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Москва, Российская Федерация

ТАМРАЗЯН Ашот Георгиевич, д-р техн. наук, профессор
ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Москва, Российская Федерация

ТЕР-МАТИРОСЯН Армен Завенович, д-р техн. наук
ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Москва, Российская Федерация

ТРАВУШ Владимир Ильич, вице-президент РААСН, д-р техн. наук, профессор ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

ФАРФЕЛЬ Михаил Иосифович, канд. техн. наук
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

ФЕДЮК Роман Сергеевич, д-р техн. наук, доцент
Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Российская Федерация

ХАЧИЯН Эдуард Ефремович, академик НАН РА, д-р техн. наук, профессор
Национальный университет архитектуры и строительства Армении, Ереван, Республика Армения

ЧЕЛЫШКОВ Павел Дмитриевич, д-р техн. наук, доцент
АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

ЧЕРЕВЕРЕВ Виктор Григорьевич, д-р геолого-минералогических наук, ФГБОУ ВО «МГУ им. М.В. Ломоносова», Москва, Российская Федерация

ШУЛЯТЬЕВ Олег Александрович, д-р техн. наук, НИИОСП им. Н.М. Герсеевского
АО «НИЦ «Строительство», Москва, Российская Федерация

Вестник НИЦ «Строительство»
Научный потенциал строительной отрасли

Вып. 2(49) / под ред. А.И. Звездова. – М.: АО «НИЦ «Строительство», 2026. – 168 с.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI журнала: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI выпуска: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49))

В действующем Перечне ВАК от 29.06.2026 г. под номером 634.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
ПИ № ФС77-75188 от 22 февраля 2019 г.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации
Эл № ФС77-82129 от 18 октября 2021 г.

Содержит статьи, посвященные актуальным проблемам и перспективам строительной науки, непосредственно связанным с решением практических задач.

Для научных работников, инженеров-проектировщиков, преподавателей, аспирантов.

ISSN 2224-9494 (Print)

ISSN 2782-3938 (Online)

© АО «НИЦ «Строительство»,

«Вестник НИЦ «Строительство», 2026

EDITORIAL BOARD

UDC 69; 624; 55; 550.34; 531.01; 531.03

Editor in Chief

ZVEZDOV Andrey I., Dr. Sci. (Engineering), Professor

Scientific Editor

SMIRNOVA Lyubov' N., Cand. Sci. (Engineering)

BAZHENOV Valentin G., Academician of AES, Dr. Sci. (Physical and Mathematical), Professor Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod (UNN), Nizhni Novgorod, Russian Federation

BROUCHKOV Anatoly V., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

VAL Dimitri V., Dr., Professor School of the Built Environment, Edinburgh, UK

VOLKOV Andrey A., Dr. Sci. (Engineering), Professor JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

VEDYAKOV Ivan I., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the RAASN, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

GUSEV Boris V., Dr. Sci. (Engineering), Professor, President of Russian Academy of Engineering (RAE), President of International Academy of Engineering (IAE), Corresponding Member of the Academy of Sciences of the Russian Federation, Moscow, Russian Federation

DAVIDYUK Aleksey N., Dr. Sci. (Engineering) KTB Beton Group, Moscow, Russian Federation

KOLYBIN Igor V., Cand. Sci. (Engineering) Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

KONDRAT'EVA Lidia N., Dr. Sci. (Engineering), Professor Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, Saint Petersburg, Russian Federation

KUZEVANOV Dmitry V., Cand. Sci. (Engineering) Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

KURBATSKY Evgeny N., Dr. Sci. (Engineering), Professor Russian University of Transport (MIIT), Moscow, Russian Federation

LYAMIN Andrei, Dr., Professor School of Engineering, Callaghan, Australia

MAILYAN Dmitry R., Dr. Sci. (Engineering), Professor Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation

MANGUSHEV Rashid A., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the RAASN, Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering (SPbGASU), Saint Petersburg, Russian Federation

MIRSAYAPOV Ilizar T., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of the RAASN, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (KazGASU), Kazan, Russian Federation

MONDRUS Vladimir L., Dr. Sci. (Engineering), Professor Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

MOKHOV Andrey I., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Academician of the Russian Academy of Natural Sciences (RANS) Non-profit partnership "Energoeffekt", Moscow, Russian Federation

NEMCHINOV Yuri I., Academician of AES, Dr. Sci. (Engineering), Professor State Enterprise "State Research Institute of Building Constructions", Kyiv, Ukraine

NESVETAEV Grigoriy V., Dr. Sci. (Engineering), Professor Don State Technical University (DSTU), Rostov-on-Don, Russian Federation

OBOZOV Vladimir I., Dr. Sci. (Engineering), Professor Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

PUZRIN Alexander, Dr., Professor Institute for Geotechnical Engineering, Zurich, Switzerland

PYATIKRESTOVSKY Konstantin P., Dr. Sci. (Engineering), Professor Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

TAMRAZIAN Ashot G., Dr. Sci. (Engineering), Professor Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

TER-MARTIROSYAN Armen Z., Dr. Sci. (Engineering) Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation

TRAVUSH Vladimir I., vice president RAASN, Dr. Sci. (Engineering), Professor CJSC "Gorproject", Moscow, Russian Federation

FARFEL Mikhail I., Cand. Sci. (Engineering) Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

FEDIUK Roman S., Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russian Federation

KHACHIYAN Eduard E., Dr. Sci. (Engineering), Academician of NAN RA, Professor National University of Architecture and Construction of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

CHELYSHKOV Pavel D., Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

CHEVEREV Viktor G., Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation

SHULYATYEV Oleg A., Dr. Sci. (Engineering), Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow, Russian Federation

Bulletin of Science and Research Center of Construction

Scientific potential of the construction industry

Issue 2(49) / edited by A.I. Zvezdov. –

M.: JSC Research Center of Construction, 2026. – 168 p.

ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)

DOI journal <https://doi.org/10.37538/2224-9494>

DOI issue [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49))

In the current version of List of HAC from June 29, 2026 our journal has a number 634.

Registered by the Federal Service for Supervision of Communications and Information Technologies and mass communications (ROSKOMNADZOR).

Mass media registration certificate PI No. FS77-75188 dated February 22, 2019.

Mass media registration certificate EI No. FS77-82129 dated October 18, 2021.

Publishes research articles on current problems and prospects of construction science, directly related to the solution of practical tasks. For scientists, engineers, teachers, postgraduate students.

ISSN 2224-9494 (Print)

ISSN 2782-3938 (Online)

© JSC Research Center of Construction, Bulletin of Science and Research Center of Construction, 2026

Содержание

СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ

Арленинов Д.К.

История и решение вопроса учёта ползучести при расчётах деревянных конструкций. 7

Лебедева И.В.

Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. Параметрический подход 15

Чесноков Д.А.

Методики расчета дюбельных соединений металлических конструкций
на растягивающую нагрузку 31

Серегин Н.Г.

Современные строительные конструкции из древесины 48

Соколов Б.С., Иванов А., Черный И.А., Титаев В.А., Пасхин Д.В.

Железобетонные структурные покрытия большепролетных зданий 59

Пуцев Д.И., Юрьев Р.В., Грошев Ю.М.

Использование полевого моделирования пожара для обоснования мероприятий
по обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений с учетом временной
пожарной нагрузки. 76

СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ

Соколова С.В.

Изучение физико-механических показателей модифицированных бетонов
специального назначения 87

Степанова В.Ф., Спивак Н.А., Харитонов Л.П.

О возможности использования песков с высоким содержанием хлоридов
в железобетонных конструкциях 97

ОСНОВАНИЯ И ФУНДАМЕНТЫ, ПОДЗЕМНЫЕ СООРУЖЕНИЯ

Алексеев А.Г., Крючков В.Г., Железняк М.Н., Лобковский Л.И., Семилетов И.П.

Основы развития геотехнического и экологического мониторингов прибрежной зоны
и акватории Северного морского пути 105

Сазонов П.М.

Несущая способность буроопускной сваи в многолетнемерзлых грунтах при использовании
цементно-песчаного раствора 123

Шулятьев О.А., Мозгачева О.А., Мышинский В.Е., Ибрагимов С.Д., Орехов В.В.

Усиление грунтов оснований и устранение кренов деформированных зданий инъекцией
цементных растворов по гидроразрывной технологии 139

ОБЗОР МЕРОПРИЯТИЙ

Конюхов Д.С., Космин В.В.

Современные тенденции, инновации и передовые практики в тоннелестроении
(по материалам Мирового конгресса ITA-AITES 2026, Монреаль) 157

CONTENTS

BUILDING CONSTRUCTIONS, BUILDINGS AND STRUCTURES

D.K. Arleninov History and solution of the issue of creep accounting in the analysis of timber structures	8
I.V. Lebedeva Loads and actions on buildings and structures. Performance-based approach	15
D.A. Chesnokov Power-actuated fastener connection in tension design methods	31
N.G. Seregin Modern building structures made of wood	48
B.S. Sokolov, A. Ivanov, I.A. Cherny, V.A. Titaev, D.V. Pashkin Reinforced concrete space frame roofs of large span buildings	59
D.I. Putsev, R.V. Yuryev, Yu.M. Groshev Using field fire modeling to justify measures for ensuring fire safety of buildings and structures considering temporary fire loads	76

BUILDING MATERIALS AND PRODUCTS

S.V. Sokolova Study of physical and mechanical properties of special-purpose modified concrets	87
V.F. Stepanova, N.A. Spivak, L.P. Kharitonova On the possibility of using sands with high chloride content in reinforced concrete structures	97

FOUNDATIONS, UNDERGROUND STRUCTURES

A.G. Alekseev, V.G. Kryuchkov, M.N. Zheleznyak, L.I. Lobkovsky, I.P. Semiletov Fundamentals of the development of geotechnical and environmental monitoring of the coastal zone and the water area of the Northern Sea route	105
P.M. Sazonov Bearing capacity of slurried piles in permafrost soils using cement-sand mortar	123
O.A. Shulyatyev, O.A. Mozgacheva, V.E. Myshinsky, S.D. Ibragimov, V.V. Orekhov Strengthening foundation soils and eliminating tilts of deformed buildings by in-j ecting cement mortars using hydraulic fracturing technology	139

EVENT OVERVIEW

D.S. Konyukhov, V.V. Kosmin Modern trends, innovations and best practices in tunnel construction (based on materials from the ITA-AITES 2026 World Congress, Montreal)	157
---	-----

ИСТОРИЯ И РЕШЕНИЕ ВОПРОСА УЧЁТА ПОЛЗУЧЕСТИ ПРИ РАСЧЁТАХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Д.К. АРЛЕНИНОВ, д-р. техн. наук., профессор

Независимый исследователь, Москва

Аннотация

Введение. До сего времени при расчётах деревянных конструкций, древесину рассматривают практически, как упругий материал. Лишь в последней редакции СНиП11-25-80 была предпринята попытка учёта ползучести при расчётах по деформированной схеме и на устойчивость, путём введения пониженной нормы модуля упругости $E = 300 R$. Однако эта норма оказалась не востребованной, так как остаточные относительные деформации не соответствуют упругим, и зависят от уровня напряжений на отдельных интервалах изгибаемого элемента. Таким образом при линейных расчетах следует отказаться от интегрального модуля упругости элемента, а использовать интервальные значения модулей, которые имеют переменные величины в зависимости от уровня напряжений.

Цель. Совершенствование линейного метода расчёта изгибаемых и сжато-изгибаемых деревянных конструкций с учётом ползучести древесины, используя длительный модуль упругости.

Материалы и методы. Впервые в практике деревянных конструкций, для получения величины длительного модуля упругости в зависимости от уровня напряжений, разработана методика и проведены пробные длительные испытания при изгибе. Образцы изготавливались из ели и выдерживались до затухания прогибов. Шаг изменения напряжения составлял 1,0 МПа.

Результаты. Время проведения испытаний при низких уровнях напряжений: 1–1,5 месяца, для высоких: 10–12 месяцев. По данным прогибов составлена предварительная таблица длительных модулей. Сравнение результатов расчётов конструкций с использованием переменных модулей показали значительное расхождение с результатами по нормативной методике.

Выводы. Система «ЛИРА-САПР» позволяет реализовать в линейной постановке двухэтапный метод расчёта изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов с учётом ползучести древесины, используя для этого табличные значения длительных модулей упругости в зависимости от уровня напряжений. Достоверные данные для таблицы могут быть получены по результатам длительных испытаний изгибаемых элементов в приспособленных помещениях.

Ключевые слова: ползучесть древесины, деревянные конструкции, длительные деформации, переменный модуль упругости

Для цитирования: Арленинов Д.К. История и решение вопроса учёта ползучести при расчётах деревянных конструкций // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2026. № 2(49). С. 07–14. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-07-14](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-07-14) EDN: HINCLR

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.01.2026

Поступила после рецензирования 17.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

HISTORY AND SOLUTION OF THE ISSUE OF CREEP ACCOUNTING IN THE ANALYSIS OF TIMBER STRUCTURES

D.K. ARLENINOV, Dr. Sci. (Engineering), Professor

Independent Researcher, Moscow

Abstract

Introduction. Until now, in the analysis of timber structures, wood has been considered practically as an elastic material. Only in the latest edition of SNiP II-25-80 was an attempt made to account for creep in second-order analysis and stability design by introducing a reduced modulus of elasticity, $E = 300 R$. However, this provision turned out to be unclaimed, because residual relative deformations do not correspond to elastic ones and depend on the stress level at individual intervals of the bending element. Thus, in linear analysis, the integral modulus of elasticity of an element should be abandoned in favor of interval values of moduli that vary with the stress level.

Aim. Improvement of the linear method for the analysis of bending and beam-column timber structures taking into account wood creep by using the long-term modulus of elasticity.

Materials and methods. For the first time in timber engineering practice, a methodology has been developed and pilot long-term bending tests have been carried out to obtain the long-term modulus of elasticity depending on the stress level. Specimens were made of spruce and were held until the deflections stabilized. The stress increment step was 1.0 MPa.

Results. The test duration at low stress levels was 1–1.5 months; at high levels, 10–12 months. A preliminary table of long-term moduli was compiled based on the deflection data. A comparison of structural analysis results using variable moduli showed a significant discrepancy with the results obtained by the standard method.

Conclusions. The LIRA-SAPR software system enables the implementation of a two-stage linear approach for the analysis of bending and beam-column elements accounting for wood creep, using tabulated values of the long-term modulus of elasticity depending on the stress level. Reliable data for the table can be obtained from long-term tests of bending elements in adapted premises.

Keywords: creep of wood, timber structures, long-term deformations, variable modulus of elasticity

For citation: Arleninov D.K. History and solution of the issue of creep accounting in the analysis of timber structures. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 07–14. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-07-14](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-07-14) EDN: HIHCLR

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 12.01.2026

Revised 17.02.2026

Accepted 05.03.2026

Введение

Изучением деформационных свойств древесины, бетона и других упругопластических материалов серьёзно начали заниматься с 30-х годов прошлого века, когда дефицит стали и арматуры при строительстве промышленных объектов компенсировали деревянными конструкциями. При расчётах в те времена на прочность и деформативность древесины рассматривали как упругий материал. В тоже время при обследовании старых построек фиксировались значительные прогибы от длительных эксплуатационных нагрузок [1]. Но поскольку приоритетом в исследованиях была прочность древесины, в том числе и длительная прочность, то вопросам пластических свойств не уделялось достаточного внимания. [2]. Факт наличия ползучести был отражён в существующих документах по проектированию изгибаемых и сжатоизгибаемых несущих конструкций, требованием «строительного подъёма». Вследствие этого вопрос деформативности во времени при проектировании конструкций ограничивался выполнением требований таблицы предельных прогибов в долях пролёта, для различных несущих конструкций, которая составлялась по результатам системных наблюдений и инженерной интуиции. Таким образом проблема деформативности уходила на второй план. Тем более, что практически все несущие конструкции того времени были статически определимые, в которых влияние ползучести при расчётах на прочность не наблюдается.

Отличие от древесины учёт ползучести бетона при расчёте железобетонных конструкций развивался в теоретических и экспериментальных исследованиях значительно интенсивнее и не теряет актуальности до сего времени [3–5].

Начиная с 70-х годов прошлого столетия в связи с появлением большепролетных клеёных конструкций, а затем и с появлением для этих конструкций жёстких узлов соединений на клеенных стержнях, в последней советской редакции СНиП II-25-80, появилась пониженная норма модуля упругости древесины $E = 300 R = 4000$ МПа, которая по ряду причин оказалась невостребованной при проектировании, а вопросами истории появления и достоверности отношения $E/R = 300$ никто не занимался. В начале века, из разрозненных и немногочисленных изданий 30–70 годов прошлого века выявлено, что в те времена в расчётах сжато-изгибаемых элементов использовали пониженный модуль упругости, который в неявном виде предполагал учёт ползучести. Объяснением долголетия этой нормы, на мой взгляд, являются запасы прочности при вычислении деформационных моментов. При изгибе учёт ползучести учитывался коэффициентами условий работ, как и в прежних СНиПах и инструкциях. В сводах правил 2011 и 2017 годов такой подход к учёту ползучести остался практически прежним, т.е. идея постоянного пониженного модуля осталась, но менялись лишь величины E , на взгляд автора недостаточно обоснованные.

Аналогичный подход к учёту ползучести посредством понижающих коэффициентов условий работы к постоянной величине модуля упругости, полученной по результатам кратковременных испытаний малых образцов при изгибе, представлен в ЕВРОКОД 5-EN 1995. В этом документе также предусмотрены коэффициенты деформативности, которые изменяются от 0,5 до 0,9 в зависимости от класса эксплуатации конструкций и класса продолжительности действия нагрузки. Такое застывшее состояние изучения ползучести древесины за рубежом также не стимулировало и в нашей стране развитие исследований по совершенствованию нормативных документов в этом направлении.

Лишь появление автоматизированных вычислительных комплексов, а также внедрение большепролётных конструкций с жёсткими узлами, поставили вопрос о возможно-

сти и необходимости повышения точности линейных расчётов, за счёт учёта ползучести древесины, используя двухэтапный метод расчёта с применением переменных величин длительных модулей упругости. [6–8] в котором на первом этапе используется базовое значение E , а на втором этапе изгибаемые и сжато-изгибаемые элементы конструкций разбиваются жёсткими узлами на интервалы с переменными длительными модулями упругости.

Материалы и методы исследования

Нормативный метод расчёта деревянных конструкций по 2-му предельному состоянию, на прочность по деформированной схеме и устойчивость показал, что линейная методика за последние пятьдесят лет практически не изменилась. Ползучесть учитывается спорными коэффициентами условий работы, которые были получены при исследовании прочностных характеристик древесины и автоматически перенесены при нормировании модуля упругости. Основные механические характеристики за прошедшее время не изменялись, поэтому для исследований применялась подмосковная ель 1 и 2-го сорта, соответственно для высоких и низких уровней напряжений. Следует отметить, что базовая величина модуля упругости $E = 10000$ МПа получена на основании стандартных кратковременных испытаний при изгибе в довоенное время, что не вызывает сомнения, в правомерности её использования. Длительные испытания древесины в режиме «изгиб», когда волокна по высоте сечения напряжены неравномерно, не проводились и отсутствуют какие-либо стандарты или методические материалы по этому вопросу. Что касается бетона, то такие исследования проводились в крайне малых объёмах, и воспользоваться их опытом не представляется возможным, только относительно недавно была предложена методика таких испытаний, которая впоследствии вошла в ГОСТ 24544-2020 [9]. Следовательно, для корректных линейных расчётов необходимо применять переменные значения длительных модулей упругости, полученные при длительных испытаниях в режиме «изгиб». Это требование косвенно подтверждается результатами теоретических исследований в Томском ГАСУ [10] при совершенствовании алгоритма смешанного метода расчёта конструкций, позволяющий учитывать изменение длительного модуля упругости не только по длине, но и по высоте сечения. Высота при этом разбивается на слои, равные толщине досок клеёных балок. Представлены четыре примера расчётов клеёных балок под различные нагрузки. Расхождение результатов расчётов с использованием алгоритма смешанного метода с результатом расчёта в ЛИРЕ-САПР составляло до 11 %, что позволяет при практических расчётах пренебрегать изменением длительного модуля по высоте сечения балок.

Результаты обзорных, экспериментальных и численных исследований

После многолетнего перерыва, связанного в нашей стране с перестройкой, когда вопросами расчёта деревянных конструкций практически не занимались, с нулевых годов нашего века начали появляться публикации по расчёту сжато-изгибаемых элементов. По этим публикациям можно проследить два направления совершенствования расчётов.

Первое направление – теоретические исследования в части учёта пластических свойств древесины при расчёте деревянных конструкций. Современные исследователи в своих работах, используя сложный математический аппарат, пытаются одновременно

оценить влияние различных факторов на НДС деревянных конструкций. Все эти факторы от нагрузок, до климатических воздействий, изменяющихся во времени, рассматриваются в совокупности с переменными механическими свойствами древесины [11,13]. Тормозом для развития этого направления является отсутствие реальной достоверной версии диаграммы работы древесины в связи с изменчивыми свойствами характерными для природных материалов.

Второе направление – развитие линейных нормативных расчётов, в части учёта ползучести древесины, которое появилось благодаря огромным вычислительным компьютерным возможностям. Но для этого необходимо ввести в нормы новый показатель деформативности древесины – таблицу переменного длительного модуля упругости в зависимости от уровня напряжений с определённым шагом, который необходимо получить по результатам длительных испытаний древесины при изгибе. Преимущество второго направления заключается в том, что реализация линейных расчётов в два этапа позволяет в массовом порядке, с использованием, например, комплекса ЛИРА-САПР с требуемой точностью учитывать процесс ползучести, не прибегая к сложным алгоритмам нелинейных расчётов. При этом результаты расчётов могут быть близки к нелинейным расчётам. [14, 16].

Возможность использования линейных расчётов деревянных конструкций была обоснована А.Р. Ржаницыным [17] который классифицировал ползучесть древесины тремя стадиями. При расчётных уровнях напряжений от нуля до расчётного сопротивления, деформации ползучести древесины пропорциональны нагрузкам и с течением времени асимптотически затухают, приближаясь к своему длительному значению для фиксированной нагрузки. Эта стадия называется линейной ползучестью, что позволяет вычислять длительные относительные деформации, пользуясь линейным аппаратом расчёта по закону Гука.

Необходимость учёта ползучести при расчёте деревянных конструкций была апробирована в последней редакции СНиП 11-25-80, путём внесения постоянного пониженного значения длительного модуля упругости при расчёте на прочность и устойчивость деревянных сжато-изгибаемых элементов по деформированной схеме. Полвека назад во времена ручных расчётов, это казалось современным и актуальным, поскольку обеспечивался запас прочности в расчётных сечениях для новых видов конструкций с жёсткими узлами. Однако постоянное значение длительного модуля не отражало реального деформированного состояния конструкции и давало повышенные значения расчётных прогибов. Этот факт объясняется тем, что остаточные относительные деформации не соответствуют упругим и зависят от уровня напряжений на отдельных участках изгибаемого элемента. В приопорных зонах, где нормальные напряжения малы остаточные деформации могут и отсутствовать. Зато к середине пролёта при расчётных нагрузках они могут превышать упругие в два, три раза. Таким образом при линейных расчётах следует отказаться от интегрального модуля упругости и использовать табличные значения модулей, которые изменяются на отдельных интервалах с фиксированным шагом напряжений по длине пролёта.

Пробные экспериментальные исследования по определению длительных модулей были проведены автором в МГСУ в рамках обучения магистрантов. Учитывая текучесть исполнителей (студентов) и неприспособленность помещения с точки зрения температурно-влажностного режима, были получены не вполне достоверные результаты, которые показали тенденцию к изменению величины модуля при изменении напряжений с шагом 1,0 МПа по длине пролёта. Испытывались образцы пролётом 150 см и сечением

10 × 2 (Н) см. Малая высота принималась, чтобы избежать влияния на прогиб сдвигающих усилий. При малых напряжениях до 5 МПа время затухания прогиба не превышало 1,5 месяца. При напряжениях близким к расчётному сопротивлению время затухания необходимо принимать 10–12 месяцев. Влажность колебалась в диапазоне 7–12 %, что не позволило признать испытания успешными. Тем не менее результаты испытаний по определению величин длительного модуля были сведены в таблицу с соответствующими комментариями и использовались студентами при расчётах в квалификационных работах. Пробные испытания подтвердили простоту эксперимента, а замена измерения относительных деформаций на их вычисление, существенно облегчило получение конечного результата. В качестве примера, эти переменные параметры длительных модулей упругости использовались при расчёте двухшарнирной арки пролётом 50 м со снеговой нагрузкой по различным схемам снегоотложения. Результаты расчётов сравнивались с результатами нормативных расчётов по СП 64.13330.2017. Величины прогибов показывают значительное расхождение до 50 %, а расхождение по усилиям до 17 % [18–19]. Аналогичные расчёты проводились в Федеральном университете в Красноярске при исследовании большепролётной линзообразной статически неопределимой блок-фермы. Проведённые исследования показывают необходимость учёта ползучести древесины при расчётах статически неопределимых деревянных конструкций.

Заключение

1. В связи с широким распространением автоматизированных комплексов проектирования появилась возможность использования линейных методов расчёта для учёта ползучести древесины во времени. Для этого необходимо ввести в нормы переменные показатели длительных модулей упругости в зависимости от уровня напряжений с требуемым регулярным шагом.

2. Впервые в исследовательской практике деревянных конструкций разработана методика определения длительных модулей упругости изгибаемых элементов при различных нагрузках. Проведены пробные длительные испытания и получены значения модулей с шагом 1,0 МПа в рамках, не превышающих расчётное сопротивление, т.е., в области линейной ползучести.

3. Проведены нормативные расчёты и расчёты с использованием полученных при эксперименте переменных величин длительных модулей ряда статически неопределимых конструкций. Сравнение результатов расчётов показывает значительные расхождения, как по усилиям до 17 %, так и по перемещениям узлов до 50 %.

4. В настоящее время реализуется программа строительства деревянных домов повышенной этажности. В рамках этой программы предлагается проведение исследований по определению тенденций изменения длительных модулей упругости древесины во времени и использование этих данных при расчёте несущих изгибаемых и сжато-изгибаемых элементов каркаса.

Список литературы

1. Арленинов П.Д. Типичные повреждения подтопленных жилых домов при наводнении в Амурской области // *Жилищное строительство*. 2013. № 12. С. 19–23. EDN: RSEBSL
2. Цепяев В.А. Оценка модуля упругости древесины конструкций // *Жилищное строительство*. 2003. № 2. С. 11–13. EDN: JXNTWX

3. Крылов С.Б., Арленинов П.Д. Современные исследования в области теории ползучести бетона // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2018. № 1(16). С. 67–75. EDN: YNSGCY
4. Арленинов П.Д. Деформирование и устойчивость сжатых и внецентренно-сжатых стержневых железобетонных элементов с учетом ползучести и трещинообразования: специальность 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения» диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Арленинов Петр Дмитриевич. Москва, 2016. 143 с. EDN: ZCLBRD
5. Травуш В.И., Арленинов П.Д., Десяткин М.А. [и др.]. Исследование ползучести сталежелезобетонных образцов // *Строительство и реконструкция*. 2024. № 1(111). С. 49–63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63 EDN: AETEPS
6. Арленинов Д.К. Переменный модуль деформаций для расчёта деревянных конструкций. Сборник научных трудов. Современные строительные конструкции из металла и древесины. Ч. 2. ОАГАСИА Одесса. 2006. С. 3–5.
7. Арленинов Д.К. Учёт ползучести древесины при расчёте деревянных конструкций // *Деревообрабатывающая промышленность*. 2008. № 2. С. 10–11. EDN: ILGKNV
8. Арленинов Д.К., Арленинов П.Д. Переменный модуль упругости // *Вестник МГСУ*. 2011. № 1. Ч. 2. С. 150–152. EDN: OUVZIL
9. Arleninov P.D., Krylov S.B., Kuzevanov D.V. Methodology of Long-Term Concrete Tests for Bending. *Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018): Proceedings 2nd International Workshop*, Moscow, June 06–07, 2018. Moscow: American Concrete Institute, 2018. EDN: YNYMGL
10. Раков В.Д., Тухфатуллин Б.А., Путеева Л.Е. Алгоритм смешанного метода для определения прогибов в деревянных балках при учёте длительного нагружения // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 4(51). С. 225. EDN: COECAC
11. Пятикрестовский К.П., Травуш В.И. О программировании нелинейного метода расчёта деревянных конструкций // *Строительные науки*. 2015. № 2. С. 117–121. EDN: UGUXFZ
12. Раков В.Д., Тухфатуллин Б.А. и др. Апробация конечного элемента смешанного метода для расчёта плоских систем с учётом физической нелинейности // *Инженерный Вестник Дона*. 2019. № 6. EDN: NWBSJO
13. Вареник К.А. Расчёт центрально сжатых деревянных элементов с учётом ползучести. Кандидатская диссертация. МГСУ 2015. EDN: LVLMEB
14. Гранкин К.В., Шмидт А.Б. О методах расчёта сжато-изгибаемых элементов // *Интернет-журнал «Науковедение»*. 2016. № 3. Т. 8.
15. Тухфатуллин Б.А. и др. Расчёт плоских стержневых систем с переменным по длине модулем упругости конечных элементов в форме смешанного метода // *Инженерный вестник Дона*. 2018. № 3. EDN: YRQOBV
16. Арленинов Д.К. О расчёте деревянных конструкций по деформированной схеме // *Промышленное и гражданское строительство*. 2016. № 1. С. 43–46. EDN: VHFQDH
17. Ржаницин А.Р. Строительная механика. М.: Высшая школа. 1982. 398 с.
18. Инжутов И.С. и др. Учёт ползучести древесины в расчётах деревянных конструкций на примере линзообразной блок-фермы // *Вестник Дагестанского гос. тех. университета*. 2017. Т. 44. № 3. С. 156–164.
19. Арленинов Д.К. Оценка точности нормативной методики расчёта сжатоизгибаемых деревянных элементов // *Промышленное и гражданское строительство*. 2021. № 2. С. 12–16. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.02.12-16 EDN: ULBXCA

References

1. Arleninov P.D. Typical damages of flooded residential buildings during the flood in the Amur region. *Housing Construction*, 2013, no. 12, pp. 19–23. EDN: RSEBSL
2. Tsepaev V.A. Evaluation of the modulus of elasticity of structural timber. *Housing Construction*, 2003, no. 2, pp. 11–13. EDN: JXNTWX
3. Krylov S.B., Arleninov P.D. Modern research in the field of concrete creep theory. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2018, no. 1(16), pp. 67–75. EDN: YNSGCY
4. Arleninov P.D. Deformation and stability of compressed and eccentrically compressed bar reinforced concrete elements taking into account creep and cracking: specialty 05.23.01 “Building structures, buildings and structures” dissertation for the degree of candidate of technical sciences / Arleninov Petr Dmitrievich. Moscow, 2016, 143 p. EDN: ZCLBRD

5. Travush V.I., Arleninov P.D., Desyatkin M.A. [et al.]. Investigation of creep of steel-reinforced concrete specimens. *Building and Reconstruction*, 2024, no. 1(111), pp. 49–63. DOI: 10.33979/2073-7416-2024-111-1-49-63 EDN: AETEPS
6. Arleninov D.K. Variable deformation modulus for the analysis of timber structures. Collection of scientific papers. Modern building structures of metal and wood. Part 2. Odessa: Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture, 2006, pp. 3–5.
7. Arleninov D.K. Accounting for wood creep in the analysis of timber structures. *Woodworking Industry*, 2008, no. 2, pp. 10–11. EDN: ILGKNV
8. Arleninov D.K., Arleninov P.D. Variable modulus of elasticity. *Vestnik MGSU*, 2011, no. 1, part 2, pp. 150–152. EDN: OUVZIL
9. Arleninov P.D., Krylov S.B., Kuzevanov D.V. Methodology of Long-Term Concrete Tests for Bending. Durability and Sustainability of Concrete Structures [DSCS–2018]: *Proceedings 2nd International Workshop*, Moscow, June 06–07, 2018. Moscow: American Concrete Institute, 2018. EDN: YNYMGL
10. Rakov V.D., Tukhfatullin B.A., Puteyeva L.E. Algorithm of the mixed method for determining deflections in wooden beams taking into account long-term loading. *Engineering Journal of Don*, 2018, no. 4(51), p. 225. EDN: COECAC
11. Pyatikrestovsky K.P., Travush V.I. On programming the nonlinear method of analysis of timber structures. *Building Sciences*, 2015, no. 2, pp. 117–121. EDN: UGUXFZ
12. Rakov V.D., Tukhfatullin B.A. [et al.]. Approbation of a finite element of the mixed method for the analysis of planar systems taking into account physical nonlinearity. *Engineering Journal of Don*, 2019, no. 6. EDN: NWBSJO
13. Varenik K.A. Analysis of centrally compressed wooden elements taking into account creep. Candidate dissertation. MGSU, 2015. EDN: LVLMEB
14. Grankin K.V., Shmidt A.B. On methods of analysis of beam-column elements. *Internet-journal Naukovedenie*, 2016, no. 3, vol. 8.
15. Tukhfatullin B.A. [et al.]. Analysis of planar bar systems with a variable modulus of elasticity along the length of finite elements in the form of a mixed method. *Engineering Journal of Don*, 2018, no. 3. EDN: YRQOBV
16. Arleninov D.K. On the analysis of timber structures according to the deformed scheme. *Industrial and Civil Engineering*, 2016, no. 1, pp. 43–46. EDN: VHFQDH
17. Rzhantsyn A.R. Structural Mechanics. Moscow: Vysshaya Shkola, 1982, 398 p.
18. Inzhutov I.S. [et al.]. Accounting for wood creep in the analysis of timber structures on the example of a lens-shaped block truss. *Herald of Dagestan State Technical University*, 2017, vol. 44, no. 3, pp. 156–164.
19. Arleninov D.K. Assessment of the accuracy of the standard method for analyzing beam-column wooden elements. *Industrial and Civil Engineering*, 2021, no. 2, pp. 12–16. DOI: 10.33622/0869-7019.2021.02.12-16 EDN: ULBXCA

Информация об авторе / Information about the author

Арленинов Д.К., д-р. техн. наук, профессор, независимый исследователь, Москва
e-mail: dkarleninov@mail.ru
Arleninov D.K., Dr. Sci. (Engineering), Professor, Independent Researcher, Moscow
e-mail: dkarleninov@mail.ru

НАГРУЗКИ И ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ. ПАРАМЕТРИЧЕСКИЙ ПОДХОД

И.В. ЛЕБЕДЕВА¹, канд. техн. наук

¹ Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций (ЦНИИСК) им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Рассматривается реализация основных положений Стратегии в части формирования современных подходов к методологии перехода на параметрическое нормирование в области нагрузок и воздействий на здания и сооружения в нашей стране. Приведен анализ основных критериев для выработки базовых параметров нагрузок, воздействий, влияния окружающей среды в целях обеспечения требуемой надежности и безопасности, а также нормальной эксплуатации сооружений, защиты от возможного возникновения аварийных расчетных ситуаций, и предложены пути их дальнейшего совершенствования.

Цель. Разъяснение основных подходов к внедрению параметрического нормирования в области нагрузок и воздействий в строительстве, реализованных в проекте СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения», анализ различий в существующих и перспективных подходах к ее трактовке в отечественных и зарубежных нормативных документах и выработка инновационной стратегии дальнейшего развития отечественной нормативной базы.

Материалы и методы. Исследована структура российских и зарубежных нормативных документов в области нагрузок и воздействий, приведен их сравнительный анализ. Выработаны основные подходы к параметрическому нормированию нагрузок и воздействий в строительной отрасли.

Результаты. Проведенный анализ позволил установить критерии, на основе которых устанавливаются различные виды нагрузок, воздействий, их расчетные сочетания, влияние окружающей среды при гарантированном соблюдении надежности и безопасности технических решений. Установлены базовые требования к нормированию прогибов и перемещений элементов строительных конструкций. Показано, что совместное использование полувероятностного подхода на основе нормирования частных коэффициентов надежности по нагрузкам, и некоторых качественных, вероятностных и риск-ориентированных критериев оценки надежности, нагрузок и воздействий, принятых в зарубежной нормативной базе, в частности в ИСО 2394:2015 и Еврокодах, помогут при выборе оптимальных проектных и технологических решений.

Выводы. Внедрение проекта СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения» в практику проектирования совместно с разработкой новых СП, содержащих правила проектирования и значения параметров для отдельных видов нагрузок и воздействий, а также определения максимальных значений прогибов и перемещений будет содействовать унификации требований к нагрузкам и воздействиям на основе формирования общих подходов к методологии перехода на параметрическое нормирование в строительстве на территории Российской Федерации и способствовать снижению стоимости и сроков строительства, а также развитию новых материалов и технологий. Разрабатываемый комплекс документов создаст общую основу нормирования нагрузок и воздействий и позволит оптимизировать проектирование зданий и сооружений, что повысит их экономическую эффективность.

Ключевые слова: надежность, строительная конструкция, параметрическое нормирование, нагрузка, воздействие, особые воздействия, влияние окружающей среды, расчетные сочетания нагрузок, перемещения, риск-ориентированный подход

Для цитирования: Лебедева И.В. Нагрузки и воздействия на здания и сооружения. Параметрический подход // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 15–30. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-15-30](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-15-30) EDN: IEUITO

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.02.2026

Поступила после рецензирования 01.03.2026

Принята к публикации 12.03.2026

LOADS AND ACTIONS ON BUILDINGS AND STRUCTURES. PERFORMANCE-BASED APPROACH

I.V. LEBEDEVA¹, Cand. Sci. (Engineering)

¹ Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. This article examines the implementation of the Strategy's key provisions in terms of developing modern approaches to the methodology for transitioning to parametric standardization for loads and impacts on buildings and structures in our country. It analyzes the key criteria for developing basic parameters of loads, impacts, and environmental influences to ensure the required reliability and safety, as well as the normal operation of structures and protection against potential emergency design situations, and proposes ways to further improve them.

Aim. This article explains the key approaches to implementing parametric standardization for loads and impacts in construction, as implemented in the SP project "Loads and impacts. Key provisions". It also analyzes the differences in existing and prospective approaches to its interpretation in domestic and international regulatory documents and develops an innovative strategy for the further development of the domestic regulatory framework.

Materials and Methods. This article examines the structure of Russian and international regulatory documents on loads and impacts and provides a comparative analysis. Basic approaches to parametric standardization of loads and impacts in the construction industry have been developed.

Results. The analysis allowed us to establish criteria for determining various types of loads, impacts, their design combinations, and environmental influences while guaranteeing the reliability and safety of technical solutions. Basic requirements for standardizing deflections and displacements of building structure elements have been established. It has been shown that the combined use of a semi-probabilistic approach based on standardization of partial reliability factors for loads and certain qualitative, probabilistic, and risk-based criteria for assessing reliability, loads, and impacts adopted in international regulatory frameworks, particularly ISO 2394:2015 and Eurocodes, will assist in selecting optimal design and technological solutions.

Conclusions. Implementation of the SP project "Loads and impacts." The integration of the "Basic provisions" into design practice, along with the development of new SP containing design rules and parameter values for individual types of loads and impacts, as well as the definition of maximum deflections and displacements, will facilitate the unification of load and impact requirements based on the development of common approaches to the methodology for the transition to parametric standardization in construction in the Russian Federation. This set of documents will contribute to a reduction in construction costs and timelines, as well as the development of new materials and technologies. This set of documents will create a common basis for standardizing loads and impacts and will optimize the design of buildings and structures, thereby increasing their economic efficiency.

Keywords: reliability, building construction, performance-based approach, load, action, accidental actions, environmental influences, design combinations of loads, displacements

For citation: Lebedeva I.V. Loads and actions on buildings and structures. Performance-based approach. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 15–30. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-15-30](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-15-30) EDN: IEUITO

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 02.02.2026

Revised 01.03.2026

Accepted 12.03.2026

Введение

Задача перехода на параметрическую систему нормирования в строительной отрасли заявлена и утверждена Стратегией развития строительной отрасли и ЖКХ Российской Федерации на период до 2030 года. Ее развитие объявлено стратегической задачей, которую Минстрой России последовательно реализует с 2020 года. При этом все планируемые изменения должны быть результатом тщательного анализа отечественной и зарубежной практики и богатейшего опыта советской и российской инженерной школы. Разрабатываемые своды правил должны не предписывать, как проектировать и строить, а устанавливать требования к строительной продукции и проектной документации или цели, которые должны быть достигнуты в процессе проектирования и строительства.

Параметрический метод является иерархическим, основанным на иерархии целей и задач. На первом уровне нормирования задаются цели, конкретизированные для решения социально значимых задач в области строительства. Эти цели основываются на соблюдении законодательных требований (Федеральные законы № 384-ФЗ [1], № 190-ФЗ [4] (Градостроительный кодекс) и № 116-ФЗ [5] и др.). На втором уровне устанавливаются функциональные требования, которые базируются на сформулированных задачах. На третьем, самом нижнем уровне нормирования, формулируются требования к рабочим характеристикам, которые, в свою очередь, вытекают из функциональных требований.

Средства соблюдения строительных норм находятся в поле добровольности. Они реализуются в соответствующих стандартах и сводах правил.

В основу нормативной базы РФ положен комплекс документов, в результате применения которых обеспечивается соблюдение требований Федерального закона №384-ФЗ [1], перечисленный в статье 6:

1) национальные стандарты Российской Федерации (далее – национальные стандарты) и (или) своды правил (часть национального стандарта и (или) часть свода правил) [включенные в реестр требований для проведения экспертизы];

2) международные стандарты, региональные стандарты и региональные своды правил, стандарты иностранных государств и своды правил иностранных государств [со дня

регистрации указанных стандартов и сводов правил в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов];

3) стандарты организаций [со дня регистрации указанных стандартов в Федеральном информационном фонде стандартов];

4) результаты применения предусмотренных частью 6 статьи 15 настоящего ФЗ способов обоснования соответствия архитектурных, функционально-технологических, конструктивных, инженерно-технических и иных решений и мероприятий по обеспечению безопасности зданий, сооружений, процессов, осуществляемых на всех этапах их жизненного цикла, требованиям, установленным Федеральным законом «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (при наличии), утвержденные лицом, осуществляющим подготовку проектной документации.

К способам подтверждения соответствия проектных значений параметров и других проектных характеристик здания или сооружения требованиям безопасности, согласно части 6 статьи 15 Федерального закона № 384-ФЗ [1] относятся:

1) результаты исследований;

2) расчеты и (или) испытания, выполненные по сертифицированным или апробированным иным способом методикам;

3) моделирование сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;

4) оценка риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.

При переходе к параметрическому методу нормирования указанные нормативные документы образуют систему, которая формируется из 3-х комплексов [14]:

– Основные положения;

– Правила проектирования (и других строительных процессов);

– Методические указания.

В структуре разделов и комплексов Системы (параметрическая модель) требования к нагрузкам и воздействиям относятся к разделу «Механическая безопасность зданий и сооружений».

1. Структура российских нормативных документов в области нагрузок и воздействий в рамках параметрического подхода

Структура нормативных документов в области нагрузок и воздействий, действующих в настоящее время и формируемых в рамках параметрического подхода, представлена на рис. 1.

В области нагрузок и воздействий параметрический подход реализуется на нескольких уровнях. На первом уровне, который можно назвать законодательным, основные цели и задачи нормирования нагрузок и воздействий в рамках метода расчета по предельным состояниям сформулированы в федеральных законах [1–5].

На втором уровне, который можно назвать функциональным, в проекте СП «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения» предлагается установить три комплекса нормативных документов, указанные выше. В рамках первого комплекса «Основные положения», который можно отнести к базовым, АО «НИЦ «Строи-

тельство» – ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко разработан проект свода правил «Нагрузки и воздействия. Основные положения». В этом СП приводится подробная классификация и основные требования к заданию нагрузок, воздействий и их расчетных сочетаний, влияний окружающей среды, к методам оценки особых воздействий и опасных климатических явлений, а также к защите конструкций от прогрессирующего обрушения. Указываются некоторые базовые вероятностные критерии, применяемые при задании отдельных видов нагрузок и воздействий. Указанный документ должен применяться совместно с ГОСТ 27751-2014 [6], основным нормативным документом в области надежности строительных конструкций и оснований, а также с соответствующими сводами правил комплекса «Правила проектирования».



Рис. 1. Структура нормирования нагрузок и воздействий в России

Fig. 1. The structure of rationing of loads and impacts in Russia

К комплексу II «Правила проектирования» в настоящее время следует отнести действующие нормативные документы в области нагрузок и воздействий, а именно, СП 20.13330.2016 [8], СП 14.13330.2018 [7], СП 38.13330.2018 [9], СП 292.1325800.2017 [10], СП 296.1325800.2017 [11], СП 385.1325800.2018 [12], СП 413.1325800.2018 [13]. Впоследствии необходима актуализация указанных СП с целью исключения общих положений, которые вошли в СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения» и разработки правил проектирования на основе параметрического подхода. В настоящее время ведется активная разработка новых сводов правил, соответствующих принятому подходу.

По нашему мнению, международные стандарты, региональные стандарты и региональные своды правил, стандарты иностранных государств и своды правил иностранных государств, а также стандарты организаций, методические пособия и т.п. следует отнести к III комплексу документов, подтверждающих соответствие требованиям безопасности, установленным федеральными законами, а именно к комплексу «Методические указания».

2. Проект СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения»

2.1. Основные принципы, цели и задачи

Современные подходы к оценке нагрузок и воздействий в международных и зарубежных стандартах, а также история возникновения и развития идеи параметрического (performance based) нормирования подробно рассмотрены в [18].

В настоящей статье изложены некоторые аспекты разработанного проекта СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения», которые отражают идеи параметрического нормирования, с учетом сохранения накопленного десятилетиями опыта нормирования нагрузок в нашей стране.

Проект свода правил «Нагрузки и воздействия. Основные положения», реализующий новый параметрический подход к нормированию, был разработан в 2024 году и относится к комплексу «Основные положения». Он должен применяться совместно с СП «Нагрузки и воздействия. Правила проектирования», который относится к комплексу «Правила проектирования (и других строительных процессов)» и планируется к разработке в нынешнем году.

До утверждения и введения в действие обоих документов следует руководствоваться положениями СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» (с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6).

Основными задачами разработки свода правил «Нагрузки и воздействия. Основные положения» являлись:

- формирование подходов к методологии перехода на параметрическое нормирование в строительстве на территории Российской Федерации;
- снижение стоимости и сроков строительства;
- внедрение новых материалов и технологий;
- учет изменений в законодательстве Российской Федерации, актуализация нормативных ссылок, уточнение терминологии нормативных документов;
- учет основных положений по назначению нагрузок, воздействий и их сочетаний, учитываемых при расчетах зданий и сооружений;
- учет основных положений по нормированию предельных прогибов и перемещений несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Свод правил «Нагрузки и воздействия. Основные положения» следует применять совместно с основополагающим документом в области надежности строительных конструкций и оснований ГОСТ 27751-2014 (с Изменением № 1), а также сводом правил «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения», в котором установлены основные принципы формирования нормативной базы на основе параметрических принципов нормирования.

Проект нового документа разработан в более широком аспекте по сравнению с соответствующими разделами СП 20.13330.2016, исходя из необходимости унификации базовых требований и подходов к нормированию всех основных типов нагрузок и воздействий, включая сейсмические, динамические воздействия, а также волновые и ледовые нагрузки, которые регламентируются отдельными сводами правил.

2.2. Область применения и базовые подходы

Проект СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения» устанавливает основные нормативные положения и ключевые требования по назначению нагрузок, воздействий и их сочетаний, учитываемых при расчетах зданий и сооружений по предельным состояни-

ям первой и второй групп, а также по особым предельным состояниям, в соответствии с положениями ГОСТ 27751-2014 [6] и СП [14].

Состав разделов в целом соответствует действующему СП 20.13330.2016 [8], но включает только общие нормативные требования к нагрузкам, воздействиям и их сочетаниям, учитываемым при проектировании, возведении и эксплуатации строительных конструкций и их оснований в соответствии с ГОСТ 27751-2014 [8], и способам их определения.

В основу нормативных требований к назначению нагрузок и воздействий на здания и сооружения положен полувероятностный подход, основанный на задании нормативных (базовых) значений нагрузок и частных коэффициентов надежности, обеспечивающих заданную вероятность непревышения расчетных значений нагрузок.

Для климатических нагрузок и воздействий установлен период повторяемости в среднем один раз в 50 лет, что соответствует расчетному сроку эксплуатации большинства проектируемых зданий и сооружений. Такой подход принят в большинстве международных стандартов и стандартов зарубежных стран. Однако следует отметить, что заданная повторяемость расчетных значений нагрузок не связана напрямую с расчетным сроком эксплуатации, т.к. экстремальные значения нагрузок, согласно известному в климатологии принципу гетероскедастичности, могут быть реализованы в любой год в течение срока службы сооружения.

Применение прямых вероятностных методов к заданию нагрузок и воздействий и определение индексов надежности β , которые активно внедряются в Еврокодах и стандартах ИСО в области надежности [15, 17], весьма затруднительно ввиду того известного факта, что расчетные параметры климатических (снеговых, ветровых, гололедных и иных) не подчиняются нормальному закону распределения вероятностей. Для них, как правило, используются распределения, предназначенные специально для оценки статистических параметров экстремальных значений, такие как распределение Гумбеля или обобщенные распределения, характеризующие смещенными оценками их расчетных параметров.

Для особых аварийных воздействий в зарубежной практике все более широкое распространение находят методы оценки рисков систем, включающих строительные конструкции [16], которые весьма эффективны для оценки экономических и неэкономических последствий возникновения чрезвычайных ситуаций природного и антропогенного характера. Мы также приступили к созданию отечественной нормативной базы для реализации риск-информированных подходов, которую планируется разработать в течение ближайших трех–пяти лет.

Проект СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения» предназначен для того, чтобы систематизировать все применяемые в настоящее время подходы к оценке и назначению расчетных параметров нагрузок и воздействий и наметить перспективы дальнейшего совершенствования методов их определения, при этом не ограничивая возможностей развития и внедрения новых подходов и технологий, но при этом сохраняя преемственность основных положений и расчетных параметров действующей нормативной базы.

2.3 Структура свода правил

Проект СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения» содержит следующие разделы:

Предисловие

Введение

1 Область применения

2 Нормативные ссылки.

3 Термины и определения. Применены термины по ГОСТ 27751, а также термины с соответствующими определениями, касающиеся отдельных видов нагрузок и воздействий, их сочетаний и расчетных ситуаций.

4 Основные положения. Область применения требований и методов определения нагрузок и воздействий ограничена проектированием конструкций, для которых обычно накоплены достаточные знания и опыт в области проектирования и строительства, чтобы гарантировать, что целевые уровни надежности учитывают характер и последствия отказа конструкции и обеспечивают постоянные и необходимые уровни ее надежности в течение расчетного срока эксплуатации.

В разделе установлены основные требования к моделям воздействия, учету физических условий, которые могут повлиять на работу конструкции или вызвать изменение свойств материалов или конструктивных размеров. Указаны основные параметры нагрузок и воздействий, включающие их нормативные и расчетные значения, и принципы их назначения. Приведены требования по учету расчетных ситуаций и соответствующих расчетных сочетаний нагрузок, включающих основные и особые сочетания, а также принципы и критерии назначения коэффициентов надежности по нагрузке и коэффициентов сочетаний нагрузок, как правило, без указания их численных значений.

Приведены базовые требования по учету прогибов, углов поворота, перемещений и амплитуд колебания конструкций от действия всех нагрузок. Установлены критерии назначения пониженных нормативных значений нагрузок.

5 Классификация нагрузок и воздействий.

Приведена классификация нагрузок и воздействий в зависимости от продолжительности их действия (постоянные и временные), ответной реакции строительного объекта (статические и динамические), от стадии (при возведении, изготовлении, хранении и перевозке, при эксплуатации).

Введена классификация особых нагрузок и воздействий (проектные: экстремальные климатические, ударные, взрывные, от веса пожарного автотранспорта, сейсмические, волновые, ледовые, от цунами и т.д.; аварийные).

6 Сочетания нагрузок

Установлены общие принципы учета расчетных сочетаний нагрузок и воздействий (основные и особые сочетания).

7 Вес конструкций и грунтов

Установлены общие требования к определению нормативных значений нагрузок от веса конструкций и грунтов при различных расчетных ситуациях.

8 Нагрузки от оборудования, людей, животных, складироваемых материалов и изделий, транспортных средств

Сформулированы общие требования к нагрузкам от веса людей, животных, оборудования, изделий, материалов, временных перегородок, транспортных средств, действующие на перекрытия, покрытия, лестницы зданий и сооружений и полы на грунтах.

Установлены общие принципы задания вертикальных и горизонтальных нагрузок, передаваемых на элементы несущих конструкций зданий и сооружений, а также требования к способам их приложения.

9 Нагрузки от мостовых и подвесных кранов

Приведены общие требования к определению нагрузки от мостовых и подвесных кранов в зависимости от групп режимов их работы, от вида привода и способа подвеса груза, к нормативным значениям вертикальных нагрузок, передаваемых колесами кранов на балки кранового пути.

10 Снеговые нагрузки

Приведены общие принципы определения нормативного значения снеговой нагрузки на горизонтальную проекцию покрытия и вероятностные критерии определения расчетного значения веса снегового покрова.

Перечислены необходимые факторы снижения снеговой нагрузки в зависимости от возможного сноса снега с покрытий, а также вследствие таяния, вызванного потерей тепла.

Даны общие принципы назначения схем распределения снеговой нагрузки и значений коэффициента формы μ для покрытий установленных и не установленных форм. Указано на необходимость рассматривать схемы равномерно распределенных и неравномерно распределенных снеговых нагрузок на покрытия в их наиболее неблагоприятных расчетных сочетаниях, учитывать горизонтальные нагрузки от сползания снега с покрытий зданий.

Приведены общие требования по учету экстремальных значений веса снегового покрова, а также ударных нагрузок от падения снега на нижележащие конструкции.

11 Воздействия ветра

Приведены общие требования по учету воздействий ветра на здания и сооружения, включая:

- а) основной тип ветровой нагрузки (основная ветровая нагрузка), включающий сумму ее средней w_m и пульсационной w_g составляющих;
- б) пиковые значения ветровой нагрузки, действующие на конструктивные элементы ограждения и элементы их крепления (пиковая ветровая нагрузка);
- в) резонансное вихревое возбуждение;
- г) аэродинамически неустойчивые колебания типа галопирования, дивергенции и флаттера.

Установлены общие требования по оценке комфортности пешеходных зон при разработке архитектурно-планировочных решений городских кварталов, а также при планировании возведения зданий внутри существующих городских кварталов.

Даны общие указания по определению нормативных значений средней составляющей основной ветровой нагрузки, ветрового давления, приведена базовая классификация типов местности, учитываемых при определении основной ветровой нагрузки.

Приведены общие принципы учета нормативного значения пульсационной составляющей основной ветровой нагрузки.

12 Гололедные нагрузки

Сформулированы общие критерии и расчетные ситуации, при которых необходим учет гололедных нагрузок в основных и особых сочетаниях.

13 Температурные климатические воздействия

Сформулированы общие критерии и расчетные ситуации, при которых необходим учет температурных климатических воздействий в основных и особых сочетаниях.

14 Сейсмические нагрузки

Указано, что расчет конструкций и оснований зданий и сооружений, проектируемых для строительства в сейсмических районах, должен выполняться на основные и особые

сочетания нагрузок с учетом расчетной сейсмической нагрузки. Установлены общие принципы определения сейсмических воздействий в зависимости от их направления в пространстве, нормативной (фоновой) и расчетной сейсмичности площадки строительства.

Установлены принципы задания горизонтальных и вертикальных сейсмических воздействий и требуемые для учета расчетные ситуации.

15 Динамические воздействия

Приведены общие требования по учету динамических воздействий при проектировании, расчете и эксплуатации зданий и сооружений, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям и воздействиям аварийного типа, возникающим, в частности, при падении грузов, аварийной остановке оборудования и т. п.

Указаны внешние и внутренние источники динамических воздействий и исходные данные, необходимые для проведения расчета несущих конструкций, подвергающихся воздействию динамических нагрузок.

Рассмотрены основные расчетные ситуации, вызванные

а) нормальной работой, пуском и остановкой, в том числе аварийной, установленных в здании машин и оборудования с возвратно-поступательным, вращательным и другим подобным движением масс;

б) работой машин ударного действия (штампов, молотов, прессов, испытательных машин и т. п.), возбуждающих кратковременные, импульсные и т. п. нагрузки;

в) быстро прикладываемыми или снимаемыми силами (при разрушении, в том числе внезапном, несущих элементов конструкций), свободно летящих или падающих частей.

16 Общие требования по учету аварийных расчетных ситуаций

Приведены общие требования по учету обоснованных аварийных расчетных ситуаций при особых воздействиях, которые регламентируются расчетом зданий и сооружений на особые проектные нагрузки или на прогрессирующее обрушение.

Указаны расчетные сценарии аварийных расчетных ситуаций и требования к объему локальных повреждений и разрушений несущих и ограждающих конструкций для исключения угрозы жизни и здоровью людей или нормальной эксплуатации сооружений.

17 Нормируемые (проектные) особые нагрузки

Установлены следующие виды нормируемых особых нагрузок и воздействий:

– экстремальные климатические нагрузки и воздействия (снеговые, ветровые, гололедные и температурные), имеющие период повторяемости 100 лет и более;

– нагрузки при внутренних и внешних взрывах;

– ударные, в том числе нагрузки при столкновении транспортных средств, ремонтной и строительной техники с частями сооружения, удар дорожных транспортных средств по опорным частям сооружений, нагрузки, вызванные сходом с рельсов транспортных средств под конструкциями или вблизи конструкций; падение вертолета на сооружение, удар погрузчика; особые нагрузки от падения снега при его сползании с вышележащего покрытия на нижележащее покрытие, примыкающее к перепаду высот, или на прилегающую территорию и т.п.;

– нагрузки от пожарных автомобилей на стилобатные и подземные части зданий;

– воздействия при деформациях основания, сопровождающихся коренным изменением структуры грунта или его оседанием в районах горных выработок и карстовых;

– воздействия при оползнях, селях и других опасных природных процессах и явлениях;

– воздействия при деформациях основания, вызванных прорывом коммуникаций, изменением гидрологического режима вследствие нового строительства, при затоплении и подтоплении территории;

– нагрузки волновые, ледовые и от навала судов на береговые сооружения;

– нагрузки от цунами.

18 Аварийные особые нагрузки

В качестве аварийных установлены особые нагрузки и воздействия, которые возникают вследствие:

– дефектов материалов;

– ошибок при производстве работ по строительству, реконструкции, капитальному ремонту зданий и сооружений;

– ошибок проектирования;

– нарушений правил эксплуатации сооружений, в том числе их промышленного или инженерного оборудования;

– нарушений технологического процесса, временной неисправности или поломки оборудования;

– пожара;

– террористических актов и по другим, не установленным причинам.

Действие аварийных особых воздействий учитывается, на основе оценки рисков, расчетом сооружений на прогрессирующее обрушение, либо комплексом проектных, конструктивных и организационных мероприятий, установленных в рамках научного сопровождения архитектурно-строительного проектирования или в задании на проектирование, с учетом экономических затрат на их проведение.

19 Прочие нагрузки и воздействия

К прочим нагрузкам отнесены виды нагрузок, а также влияния окружающей среды, не включенные в настоящий свод правил (специальные технологические нагрузки, вибрационные нагрузки от всех видов транспорта, влажностные и усадочные воздействия, нагрузки от дождя, от отложения производственной пыли, от вулканического пепла, песка в пустынных районах), которые устанавливаются в задании на проектирование или в рекомендациях, разработанных в рамках научного сопровождения архитектурно-строительного проектирования.

20 Деформации, прогибы и перемещения

Нормы настоящего раздела устанавливают основные принципы определения деформаций, прогибов и перемещений несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений при расчете по предельным состояниям второй группы при действии статических нагрузок.

Основная цель нормирования деформаций, прогибов и перемещений - помочь проектировщику определить те аспекты, которые влияют на пригодность здания для целей, для которых оно было предназначено, и установить определенные критерии, по которым можно оценить эксплуатационные характеристики здания в этом отношении.

Деформации, прогибы и перемещения элементов строительных конструкций зданий и сооружений, их оснований и фундаментов для расчетов по предельным состояниям второй группы устанавливают на основе нормативных значений нагрузок и воздействий.

При определении прогибов, перемещений, ширины раскрытия трещин и других видов деформаций строительных конструкций и оснований с учетом длительного действия кратковременных нагрузок разрешается использовать их пониженные (длительные) значения.

Установлены основные требования и критерии пригодности к эксплуатации:

а) технологические (обеспечение условий нормальной эксплуатации технологического и подъемно-транспортного оборудования, контрольно-измерительных приборов и т.д., недопущение вибраций, которые ограничивают функциональную эффективность здания);

б) конструктивные (обеспечение целостности примыкающих друг к другу элементов конструкций и их стыков, обеспечение заданных уклонов, недопущение повреждения отделки или элементов, отличных от конструктивных, которые могут негативно сказаться на внешнем виде, долговечности или функционировании зданий и сооружений);

в) физиологические (предотвращение вредных воздействий и ощущений дискомфорта при вибрациях и колебаниях);

г) эстетико-психологические (обеспечение благоприятных впечатлений от внешнего вида конструкций, предотвращение ощущения опасности, комфорт пользователей, обеспечение нормального функционирования здания, включая функционирование инженерного оборудования).

В качестве критериев рассматриваются следующие параметры:

– вертикальные и горизонтальные прогибы и перемещения, жесткость перекрытий и покрытий;

– разница в осадках;

– колебания отдельных этажей и/или здания в целом;

– частота и амплитуда, ускорение колебаний при вибрациях;

– ширина раскрытия трещин в бетоне.

Приведен перечень и классификация предельных состояний второй группы, которые связаны с нарушением нормальной эксплуатации зданий и сооружений, с дискомфортом пользователей, потерей запланированной функциональности при нормальном использовании и постепенным износом, и соответствующие виды отказов.

Указывается на необходимость мониторинга и контроля за деформациями элементов конструкций для оценки фактического состояния элемента и его долговечности.

Положения настоящего раздела не распространяются на сооружения гидротехнические, транспорта, атомных электростанций, а также на опоры воздушных линий электропередачи, открытых распределительных устройств и антенных сооружений связи.

3. Перечень сводов правил, входящих в комплекс «Правила проектирования»

Согласно параметрическому подходу к нормированию, установление обязательных требований применяется только к эксплуатационным (функциональным) характеристикам объекта технического регулирования, в том числе к количественным параметрам, вне зависимости от его конструкции и исполнения. При этом способы достижения этих требований устанавливаются на добровольной основе с возможностью применения иных способов (подходов) на альтернативной основе.

Предполагается, что в комплекс «Правила проектирования», относящийся к нагрузкам и воздействиям, в настоящее время, до их актуализации, должны будут входить сле-

дующие своды правил: СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* «Нагрузки и воздействия» (с изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6); СП 14.13330.2018 СНиП II-7-81* «Строительство в сейсмических районах» (с изменениями № 2, № 3, № 4); СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)» (с изменением № 1); СП 292.1325800.2017. «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» (с Изменением № 1); СП 296.1325800.2017 Здания и сооружения. Особые воздействия (с изменениями № 1, № 2); СП 385.1325800.2018 Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с изменениями № 1, № 2, № 3, № 4); СП 413.1325800.2018 «Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования» (с изменением № 1). Возможно также дополнение данного перечня в процессе формирования указанного комплекса документов.

Впоследствии, при актуализации сводов правил из вышеизложенного перечня, должны быть разработаны новые редакции сводов правил комплекса «Правила проектирования», в которые не войдут общие требования, содержащиеся в СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения». При их разработке необходимо исключить дублирование нормативных требований с основными положениями, а также облегчить будущий перевод нормативной базы в машиночитаемый формат.

Выводы

1. Внедрение параметрических принципов нормирования в отечественной нормативной базе основывается на обязательных требованиях по обеспечению надежности и безопасности сооружений в части задания нагрузок и воздействий на здания и сооружения, которые содержатся в Федеральном законе № 384-ФЗ [1], в ГОСТ 27751-2014 [2] и ряде других документов, а также на базовых принципах, изложенных в новом проекте СП «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения».

2. Параметрический подход предполагает иерархическую структуру и включает три класса нормативных документов (СП), которые относятся к комплексам документов «Основные положения» и «Правила проектирования». В дополнение к указанным комплексам разрабатываются нормативные документы комплекса «Методические указания», разъясняющие отдельные положения предыдущих двух комплексов сводов правил.

3. В проекте СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения» реализуются современные принципы и подходы к назначению нагрузок и воздействий, основанные как на традиционных, полувероятностных принципах назначения расчетных параметров нагрузок и воздействий, так и позволяющие внедрять новые, современные подходы к оценке нагрузок и воздействий, не включенных в прежние редакции СП. В первую очередь, это относится к особым проектным и аварийным воздействиям, а также к опасным климатическим явлениям, к которым применимы риск-информированный подход и вероятностная оценка надежности.

4. Для климатических нагрузок установлен единый период повторяемости расчетных значений в среднем один раз в 50 лет, что соответствует общемировым подходам.

5. СП «Нагрузки и воздействия. Основные положения» должен применяться совместно со сводами правил, относящихся к комплексу «Правила проектирования» в области нагрузок и воздействий. При этом новые редакции необходимо подготовить для всех документов, входящих в этот комплекс, в том числе, для СП 20.13330.2016 [8], СП

14.13330.2018 [7], СП 38.13330.2018 [9], СП 292.1325800.2017 [10], СП 296.1325800.2017 [11], СП 385.1325800.2018 [12], СП 413.1325800.2018 [13]. До подготовки новых редакций СП действуют вышеуказанные своды правил.

6. Требования к сейсмическим нагрузкам в СП 14.13330.2018 [7] входят как составная часть документа, включающего правила проектирования сейсмостойких зданий и сооружений, поэтому в области сейсмостойкого строительства может быть разработан отдельный документ комплекса «Основные положения», не включающий требования к сейсмическим нагрузкам и их расчетным сочетаниям.

7. Новый параметрический подход к оценке нагрузок и воздействий не предполагает переход на полностью вероятностные принципы оценки надежности с применением индексов надежности b8. Принципы обеспечения надежности проектируемых зданий и сооружений в отечественной, международной и зарубежной нормативных базах достаточно близки и основываются на методе предельных состояний при разумном сочетании обязательных и рекомендуемых параметров. Основным критерий – обеспечение безопасности жизни людей.

9. Параметрический подход реализован в международных стандартах в области надежности сооружений и, в частности, в ИСО 2394:2015 [15], ISO 13824:2020 [16] и Еврокодах [17], устанавливая социальные, экономические критерии и показатели эффективности проектных решений, тогда как в области нагрузок и воздействий сохраняются полувероятностные подходы, основанные на частных коэффициентах надежности. Таким образом, принципиальных противоречий в наших подходах к нормированию нет.

10. Внедрение параметрических подходов к нормированию нагрузок и воздействий в отечественном понимании основных принципов к определению расчетных параметров нагрузок и воздействий, в рамках метода расчета по предельным состояниям, позволит ускорить создание современных механизмов внедрения инноваций и новых технологий в строительстве, включая риск-информированные подходы и новые критерии надежности, которые помогут при выборе оптимальных проектных и технологических решений при строительстве уникальных зданий и сооружений и сооружений повышенного уровня ответственности.

Список литературы

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ [интернет]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720
2. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании». Режим доступа: https://www.mos.ru/upload/documents/files/1994/8Zakonot27_12_2002N184-FZOtehnikeskomregylirovani.pdf
3. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ. Режим доступа: https://rpn.gov.ru/upload/iblock/307/4puyp0ovyl4ejpubepg4pewn7y7njqfz/Gradostroitelnyy-kodeks-Rossiyskoy-Federatsii-ot-29.12.2004-N-190_FZ-_red.-ot-24.06.2025_.pdf
4. Федеральный закон от 25 декабря 2023 г. № 653-ФЗ «О внесении изменений в федеральный закон «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» №384-ФЗ и отдельные законодательные акты Российской Федерации». Режим доступа: https://urtmag.ru/upload/iblock/fab/9bcd78cqjzf42qoasljg711khrn1lx7d/Federalnyy-zakon-ot-25_12_2023-N-653_FZ-O-vnesenii-izmenen.pdf
5. Федеральный закон от 29 июня 2015 г. N 162-ФЗ «О стандартизации в Российской Федерации» (с изменениями на 30 декабря 2020 года). Режим доступа: [http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/O%20standartizatsii%20v%20Rossiyskoy%20Federatsii%20\(c%20izmeneniyami%20na%2030%20dekabrya%202020%20goda\)_Текст.pdf](http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/O%20standartizatsii%20v%20Rossiyskoy%20Federatsii%20(c%20izmeneniyami%20na%2030%20dekabrya%202020%20goda)_Текст.pdf)

6. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (с Изменением № 1). Режим доступа: <https://protect.gost.ru/default.aspx/document.aspx?control=7&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=249345>
7. СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах» Режим доступа: <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-22/8d06e4315ca36fbefb2dd493a7ec92c3b.pdf>
8. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4, № 5, № 6). М.: Росстандарт. 2017. 127 с.
9. СП 38.13330.2018 «СНиП 2.06.04-82* Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)». М.: Госстрой СССР. 1982. 79 с.
10. СП 292.1325800.2017. «Здания и сооружения в цунамиопасных районах. Правила проектирования» (с Изменением № 1). М.: Минстрой России. 2017. 123 с.
11. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изменениями № 1, № 2). М.: ФГБУ «РСТ». 2022. 31 с.
12. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменениями № 1, № 2). М.: ФГБУ «РСТ». 2021. 22 с.
13. СП 413.1325800.2018. Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования. М.: Стандартиформ. 2020. 42 с.
14. СП Система нормативных документов в строительстве. Основные положения. М.: Росстандарт. 2025. 24 с.
15. ГОСТ Р ИСО 2394:2015 ред. 4 Конструкции строительные. Основные принципы надежности. М.: Стандартиформ. 2016. 66 с.
16. ISO 13824:2020. Bases for design of structures – General principles on risk assessment of systems involving structures. <https://www.iso.org/standard/71005.html>
17. Еврокод EN 1990:2002+A1 Eurocode 0 – Basis of structural design (Основы проектирования сооружений). https://www.srogen.ru/upload/files/doc/proekt_snip/15_EN_1990.pdf
18. Лебедева И.В., Петрова Т.А. Анализ современных подходов к оценке надежности в строительстве // Вестник НИЦ «Строительство». 2023;38(3):20–36. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-20-36](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-20-36).

References

1. Federal Law No. 384-FZ dated December 30, 2009 «Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures». https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720 (In Russian)
2. Federal Law No. 184-FZ of December 27, 2002 "On Technical Regulation". https://www.mos.ru/upload/documents/files/1994/8Zakonot27_12_2002N184-FZ0tehnikeskomregyirovanii.pdf (In Russian)
3. Urban Planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ dated December 29, 2004. https://rpn.gov.ru/upload/iblock/307/4puyp0ovyl4ejpubepg4pewn7y7njqfz/Gradostroitelnyy-kodeks-Rossiyskoy-Federatsii-ot-29.12.2004-N-190_FZ-_red.-ot-24.06.2025_.pdf (In Russian)
4. Federal Law No. 653-FZ of December 25, 2023 «On Amendments to the Federal Law «Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures» No. 384-FZ and Certain Legislative Acts of the Russian Federation». https://urtmag.ru/upload/iblock/fab/9bcd78cqjzf42qoasl711khrn1lx7d/Federalnyy-zakon-ot-25_12_2023-N-653_FZ-O-vnesenii-izmenen.pdf (In Russian)
5. Federal Law No. 162-FZ of June 29, 2015 «On Standardization in the Russian Federation» (as amended on December 30, 2020). [http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/O%20стандартизации%20в%20Российской%20Федерации%20\(с%20изменениями%20на%2030%20декабря%202020%20года\)_Текст.pdf](http://cntr-nrs.gosnadzor.ru/about/AKTS/O%20стандартизации%20в%20Российской%20Федерации%20(с%20изменениями%20на%2030%20декабря%202020%20года)_Текст.pdf) (In Russian)
6. State Standard 27751-2014. Reliability of building structures and foundations. The main provisions (with Amendment no. 1). <https://protect.gost.ru/default.aspx/document.aspx?control=7&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=249345> (In Russian)
7. SP 14.13330.2018 "SNiP II-7-81* Construction in seismic areas" <https://mchs.gov.ru/uploads/document/2022-03-22/8d06e4315ca36fbefb2dd493a7ec92c3b.pdf> (In Russian)
8. SP 20.13330.2016. Loads and impacts. Updated version of SNiP 2.01.07-85* (with changes no. 1, no. 2, no. 3, no. 4, no. 5, no. 6). М.: Rosstandart, 2017, 127 p. (In Russian)
9. SP 38.13330.2018 SNiP 2.06.04-82* Loads and impacts on hydraulic structures (wave, ice and from ships). М.: Gosstroy SSSR, 1982, 79 p. (In Russian)
10. SP 292.1325800.2017. Buildings and structures in tsunami-prone areas. Design Rules (with Amendment no. 1). М.: Minstroy Rossii, 2017, 123 p. (In Russian)

11. SP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Special impacts (with Amendments no. 1, no. 2). M.: FGBU RST, 2022, 31 p. (In Russian)
12. SP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures from progressive collapse. Design rules. Basic provisions (with Amendments no. 1, no. 2). M.: FGBU RST, 2021, 22 p. (In Russian)
13. SP 413.1325800.2018. Buildings and structures subject to dynamic impacts. Design rules. M.: Standartinform, 2020, 42 p. (In Russian)
14. SP Joint venture Regulatory documents system in construction. The main provisions. M.: Rosstandart, 2025, 24 p. (In Russian)
15. State Standard R ISO 2394:2015 ed. 4 General principles on reliability for structures (ISO 2394:2015 ed. 4 Basic principles of reliability of building structures). M.: Standartinform, 2016, 66 p. (In Russian)
16. ISO 13824:2020. Bases for design of structures – General principles on risk assessment of systems involving structures. <https://www.iso.org/standard/71005.html> (In Russian)
17. Eurocode EN 1990:2002+A1 Eurocode 0 – Basis of structural design. https://www.srogen.ru/upload/files/doc/proekt_snip/15_EN_1990.pdf (In Russian)
18. Lebedeva I.V., Petrova T.A. Analysis of modern approaches to reliability assessing reliability in construction. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2023; 38(3): 20–36. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3\(38\)-20-36](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-20-36). (In Russian)

Информация об авторе / Information about the author

Ирина Владимировна Лебедева, канд. техн. наук, заведующий лабораторией надежности сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство». Москва
e-mail: ilebedeva61@gmail.com

Irina V. Lebedeva, Cand. Sci. (Engineering), Head of Structural Reliability Department, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction. Moscow
e-mail: ilebedeva61@gmail.com

МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ДЮБЕЛЬНЫХ СОЕДИНЕНИЙ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ НА РАСТЯГИВАЮЩУЮ НАГРУЗКУ

Д.А. ЧЕСНОКОВ, канд. техн. наук

Независимый исследователь. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Высокопрочные дюбель-гвозди могут применяться для крепления оборудования, элементов ЛСТК и кровли к металлическим конструкциям как альтернатива самонарезающим винтам и сварным соединениям. Современные дюбель-гвозди позволяют крепить стальные и алюминиевые конструкции толщиной 0,5–4,0 мм, с пределом прочности до 550 Н/мм² к стальным и чугунным основаниям толщиной от 3 мм с пределом прочности до 750 Н/мм². При работе дюбельного соединения на растягивающую нагрузку возможен ряд механизмов разрушения, вероятность наступления которых должна быть проверена расчетом. В настоящее время в России действуют два свода правил по проектированию металлических конструкций (СП 260.13330.2023 и СП 294.13330.2017), имеющих положения по расчету дюбельных соединений. Данные положения имеют ряд существенных отличий и должны быть гармонизированы между собой.

Цель. Оценка точности существующих методик расчета дюбельных соединений по актуальным нормативным документам РФ, Евросоюза и США для различных механизмов разрушения креплений.

Материалы и методы. Для проверки результатов расчета были использованы данные испытаний 25 серий испытаний креплений стальных конструкций на растяжение. Для испытаний были использованы 5 типов дюбель-гвоздей различной конфигурации, диапазон толщин прикрепляемых элементов составил 0,5–3 мм, диапазон толщин базовых материалов 3–6 мм.

Результаты. В испытаниях выделены два основных механизма разрушения: вырыв дюбеля из основания и прорыв прикрепляемого листа. Данные испытаний сравнены с результатами расчета креплений по российским стандартам, а также с положениями EN 1993-1-3 и AISI S100-24. При анализе положений указанных стандартов выявлены различия в области применения и расчетных подходах.

Выводы. Установлено, что методика СП 294.13330.2017 обеспечивает наибольшую точность прогноза несущей способности в пределах своей области применения, а также может быть рекомендована для расчета креплений тонколистовых элементов ($t_1 \geq 0,8$ мм).

Ключевые слова: дюбель-гвоздь, дюбельные соединения, техника прямого монтажа, металлические конструкции, расчет соединений

Для цитирования: Чесноков Д.А. Методики расчета дюбельных соединений металлических конструкций на растягивающую нагрузку // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 31–47. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-31-47](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-31-47) EDN: CDCCPG

Вклад авторов

Чесноков Д.А. – выбор объекта и методики исследования, разработка программы проведения экспериментальных исследований, обработка результатов лабораторных испытаний с их обобщением и анализом.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.11.2025

Поступила после рецензирования 17.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

POWER-ACTUATED FASTENER CONNECTION IN TENSION DESIGN METHODS

D.A. CHESNOKOV, Cand. Sci. (Engineering)

Independent researcher: Moscow, Russian Federation

Abstract

Introduction. High-strength power-actuated pins can be used for fastening equipment, cold-formed metal buildings elements, and roof decking to metal structures as an alternative to self-drilling screws and welded joints. Modern pins allow fastening steel and aluminum components with thicknesses ranging from 0.5 to 4.0 mm and tensile strength from 330 to 550 N/mm² to steel and cast iron bases with thicknesses starting from 3 mm and tensile strength from 350 to 750 N/mm². When an anchor connection is subjected to tensile load, several failure mechanisms may occur, and their likelihood must be verified by calculation. Currently, Russia has two design codes for metal structures (SP 260.13330.2023 and SP 294.13330.2017) that include provisions for calculating anchor connections. These provisions have significant differences and need to be harmonized.

Materials and methods. To verify calculation results, data from 25 series of tensile tests on steel structure fastenings were used. Five types of pins with different configurations were tested. The thickness range of the attached elements was 0.5–3 mm, and the thickness range of the base materials was 3–6 mm.

Results. Two failure modes were identified in the tests: pull-out from the base and tearing of the attached sheet. Test data were compared with calculation results according to Russian standards, as well as with provisions of EN 1993-1-3 and AISI S100-24. Analysis of these standards revealed differences in application scope and calculation approaches.

Conclusions. It was established that the methodology of SP 294.13330.2017 provides the highest prediction accuracy of load-bearing capacity within its application scope and can be recommended for extended use when fastening thin-sheet elements ($t_1 \geq 0.8$ mm).

Keywords: power-actuated pins, power-actuated connections, direct fastening technology, steel structures, fastening design

For citation: Chesnokov D.A. Power-actuated fastener connection in tension design methods. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 31–47. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-31-47](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-31-47) EDN: CDCCPG

Author contribution statements

Chesnokov D.A. – Selection of the research subject and methodology, formulation of an experimental program, and systematic processing, synthesis, and analytical interpretation of laboratory test results.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 24.11.2025

Revised 17.02.2026

Accepted 05.03.2026

Введение

Применение высокопрочных дюбель-гвоздей для устройства креплений оборудования и элементов ЛСТК к стальным конструкциям позволяет получить надежные соединения при минимальных трудозатратах. Высокая производительность труда монтажников, выполняющих дюбельные соединения, обеспечивается применением пороховых, пневматических и аккумуляторных монтажных пистолетов [1]. Область применения современных дюбель-гвоздей включает в себя крепление стальных и алюминиевых элементов толщиной 0,5–4,0 мм, с пределом прочности от 330 до 550 Н/мм² к стальным и чугунным основаниям толщиной от 3 мм с пределом прочности от 350 до 750 Н/мм². Верхний предел толщины некоторых дюбель-гвоздей формально не ограничен, что позволяет устанавливать дюбели в стальной массив [2–6] (рис. 1, 2). Однако при производстве работ следует исключать устройство креплений вблизи сварных швов согласно требованиям СП 70.13330.2012 [7].

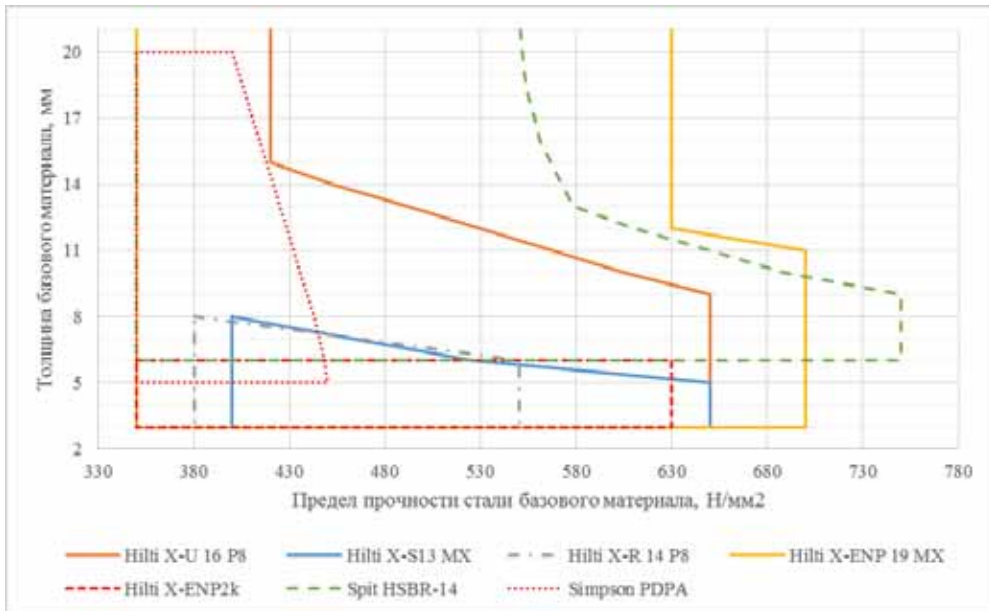


Рис. 1. Сравнение областей применения дюбель-гвоздей разных марок

Fig. 1. Comparison of application limits of different powder-actuated pins

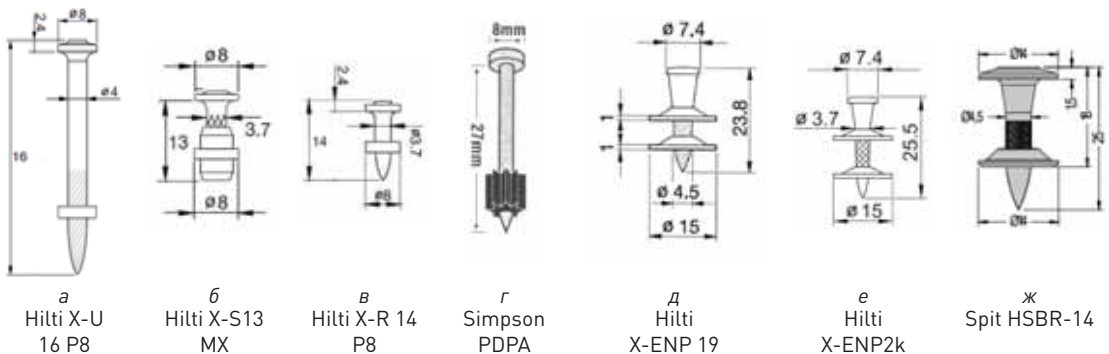


Рис. 2. Геометрические характеристики рассматриваемых дюбель-гвоздей

Fig. 2. Geometric characteristics of the investigated pins

Различия в области применения обусловлены конструктивными особенностями дюбелей (геометрия, прочность стали, технология обработки острия) [8] и мощностью удара соответствующих монтажных пистолетов. Дюбель-гвозди, предназначенные для крепления тонких профилированных листов, могут иметь специальные шайбы (рис. 2 д, е, ж) [9].

При выстреле из монтажного пистолета дюбель-гвоздь под воздействием удара поршня о головку проникает в основание, вызывая пластическую деформацию металла вокруг острия. Анкеровка крепежного элемента обеспечивается за счет силы трения стержня о материал основания и упругого обжатия стержня материалом основания за счет его локального уплотнения (рис. 3а) [10]. Сила трения, возникающая при контакте дюбеля с основанием, вызывает локальное повышение температуры, которое при наличии цинкового покрытия на элементе может дополнительно вызывать эффект спайки (рис. 3б). В отдельных случаях наблюдаются эффекты микрозащемления (при наличии насечки на стержне дюбеля, рисунок 3в) и сварки трением (рисунок 3г) [11]. Влияние каждого из механизмов крепления на несущую способность зависит от типа крепежного элемента, толщины, прочности и твердости материала основания [8]. При установке дюбелей в растянутую зону конструктивных элементов из высокопрочной стали в месте контакта могут возникать лучеобразные микротрещины, которые в случае агрессивного воздействия среды усиливают тенденцию к коррозионному растрескиванию (водородному охрупчиванию) материала основания [12].

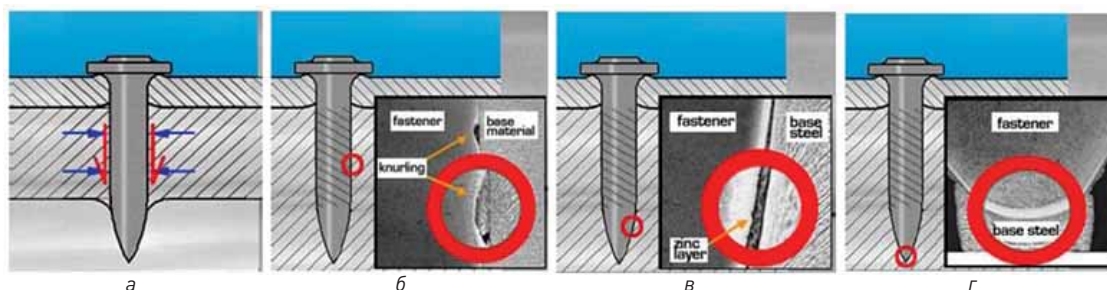


Рис. 3. Механизмы анкеровки дюбель-гвоздей
Fig. 3. Geometric characteristics of the investigated pins

Для креплений металлических конструктивных элементов к стали, работающих на растяжение и устроенных с помощью техники прямого монтажа возможны те же механизмы разрушения, что и для самонарезающих винтов, описанных в статье [13]: разрушение крепежного элемента вследствие разрушения по поперечному сечению стержня (включая отрыв головки или шайбы) (рис. 4а); вырыв дюбель-гвоздя из основания (рисунок 4б); прорыв прикрепляемого элемента (рис. 4в). Отдельные исследования выделяют несколько случаев разрушения крепления вследствие вырыва в зависимости от соотношения длины острия дюбеля и толщины прикрепляемого материала, а так же глубины анкеровки [14].

Далее рассмотрены 4 стандарта по расчету металлических конструкций, имеющих положения по расчету дюбельных соединений: российские СП 260.13330.2023 [15] и СП 294.13330.2017 [16], европейский EN1993-1-3 [17] и американский AISI S100-24 [18]. Сравнительный анализ областей применения каждого из стандартов представлен в Таблице 1.

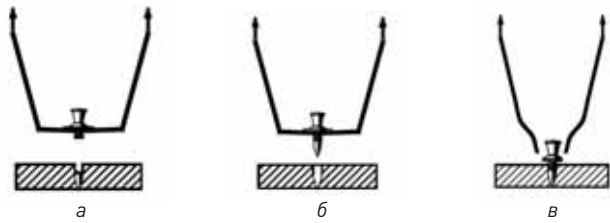


Рис. 4. Механизмы разрушения креплений на дюбель-гвоздях
Fig. 4. Powder-actuated pins failure modes

Таблица 1

Сравнение областей применения стандартов

Table 1

Comparison of the application scopes of different standards

Требование	СП 260.13330.2023, 11.1-11.2	СП 294.13330.2017, 12.4	EN 1993-1-3:2005 8.3	AISI S100-24, J6
Материал дюбель-гвоздя	Сталь с $R_{un} \geq 2000$ МПа, с твердость ≥ 55 HRC	Сталь с $R_{un} = 210-1500$ МПа	Нет требований	Углеродистая или нержавеющая сталь, с твердостью 49-61 HRC
Диаметр стержня, d	11.1.16 $d = 3,0-8,0$ мм 11.2.1 $d = 2,6-6,4$ мм	$d = 2,6-6,4$ мм	$d = 3,7-6,0$ мм	$d = 2,69-5,23$ мм
Диаметр шайбы, d_w	Нет требований	Нет требований	Нет требований	$d_w \leq 15,2$ мм (ограничение касается расчетного диаметра. Фактический диаметр не ограничен)
Прикрепляемый материал, t_1	Раздел 1 $t_1 < 4,0$ мм П. 11.1.16 Сталь с $R_{un} \leq 550$ Мпа, $t_1 = 0,5 - 1,5$ мм	Сталь с $R_{un} 355-590$ МПа, $t_1 \geq 1,5$ мм	Сталь с $R_{un} 270-550$ МПа, $t_1 = 0,5 - 1,5$ мм	Сталь с $R_{un} 275-550$ МПа $t_1 \leq 1,52$ мм
Толщина базового материала, t_2	Раздел 1 $t_2 < 4,0$ мм П. 11.1.1 $t_2 \geq 3,0$ мм П. 11.1.16 Сталь с $R_{un} \leq 550$ Мпа, $t_2 > 4,0$ мм при $d=3,7$ мм $t_2 > 6,0$ мм при $d=4,5$ мм $t_2 > 8,0$ мм при $d=5,2$ мм	Сталь с $R_{un} \leq 550$ Мпа, $t_2 = 3 - 40$ мм	Сталь с $R_{un} 360-550$ МПа, $t_2 \geq 6,0$ мм	Сталь с $R_{un} 275-550$ МПа $t_2 \leq 19.1$ мм
Краевые расстояния, e	$e = 4,5d$	$e = 4,5d$	$e = 4,5d$	$e = 12,7$ мм при $d=2,69-5,08$ мм $e = 25,4$ мм при $d=5,08-5,23$ мм
Осевые расстояния, s	$s = 4,5d$	$s = 4,5d$	$s = 4,5d$	$s = 25,4$ мм при $d=2,69-5,08$ мм $s = 40,6$ мм при $d=5,08-5,23$ мм
R_{un} – нормативное временное сопротивление HRC – твердость по Роквеллу				

Стоит отметить, что в СП 260.13330.2023 в пределах одного раздела содержатся противоречащие друг другу требования к диаметру дюбелей, а также толщинам прикрепляемого и базового материалов. Приведенное требование к прочности стали дюбелей фактически отсекает любые крепежные элементы из углеродистой стали.

Рассмотрим подходы данных стандартов к проверке прочности крепления по каждому из возможных механизмов разрушения:

Таблица 2

Сравнение методик расчета

Table 2

Comparison of design methodologies

Стандарт	Разрушение по поперечному сечению стержня (А)	Вырыв дюбель-гвоздя из основания (Б)	Прорыв прикрепляемого элемента (В)
СП 260.13330.2023	F_t определяется по результатам испытаний	F_o определяется по результатам испытаний	$F_p = d_w \cdot t_1 \cdot R_{u1}$
СП 294.13330.2017	Нет требований	$N_{do} = 0,24 \cdot R_{un2} \cdot \pi \cdot d \cdot 0.6 \cdot t_2$	$N_{dp} = d_w \cdot t_1 \cdot R_{u1}$
EN 1993-1-1:2005	Нормативное значение $F_{t,Rd}$ определяется по результатам испытаний	$F_{o,Rd}$ определяется по результатам испытаний	$F_{p,Rd} = d_w \cdot t_1 \cdot R_{u1}$
AISI S100-24	$P_{ntp} = (d/2)^2 \pi \cdot 455 \cdot 2,718^{(HRC_p/40)}$	P_{not} определяется по результатам испытаний	$P_{nov} = \alpha_w \cdot t \cdot d_w \cdot R_{u1}$

Примечания:
1. Формулы в таблице приведены для условий статического нагружения без учета коэффициентов надежности. При проектировании крепления на сопротивление ветровой нагрузке, значения F_p , N_{dp} , $F_{p,Rd}$ нужно дополнительно умножить на коэффициент 0,5.
2. Переменные формул приведены в соответствии с Таблицей 1 и следующими условными обозначениями:
 R_u – расчетное сопротивление стали;
 α_w – коэффициент, учитывающий геометрию шайбы дюбеля:
Дюбель-гвозди с головкой без шайбы или с внешней шайбой (рис. 5а), $\alpha_w=1,5$
Дюбель-гвозди с предустановленной шайбой (рис. 5б), $\alpha_w=1,25$
Дюбель-гвозди с предустановленной пружинной шайбой (рис. 5в), $\alpha_w=2,0$

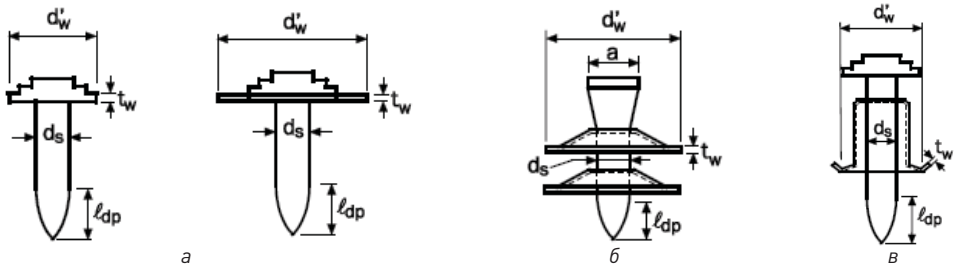


Рис. 5. Схема для определения коэффициента α_w по AISI S100-24
Fig. 5. Schematic for determining the α_w coefficient according to AISI S100-24

Во всех рассмотренных стандартах кроме AISI S100-24, в качестве коэффициента надежности по материалу (в СП 260.13330 обозначен как «коэффициент условий работы») принято значение $\gamma_m=1,25$. В строительном нормировании США сосуществуют два подхода к расчету конструкций: ASD (Allowable Strength Design) – расчет по допустимым напряжениям и LRFD (Load and Resistance Factor Design) – расчета с коэффициентами нагрузки и сопротивления [19].

Суть расчета и проектирования по ASD состоит в создании конструктивной системы, в элементах которой упругие расчетные напряжения на этапе расчета при номинальных

(фактических) нагрузках не превышали некоторого заданного допустимого напряжения. Допускаемое усилие в конструктивном элементе определяется путем деления «номинальной» прочности элемента на коэффициент Ω .

Метод LRFD схож с концепцией расчета конструкций по предельным состояниям, применяемым в России, поскольку содержит коэффициенты надежности как по нагрузке, так и по прочности элементов. Расчетное сопротивление конструктивного элемента определяется путем умножения «номинальной» прочности на коэффициент надежности Φ . Несмотря на то, что метод LRFD считается более прогрессивным и предпочтительным для расчета сложных конструктивных систем, на практике метод ASD также имеет широкое применение. По этой причине в AISI S100-24 приведено два набора коэффициентов надежности для разных механизмов разрушения (Таблица 3).

Таблица 3

Коэффициенты надежности по AISI S100-24

Table 3

Safety factors according to AISI S100-24

Характер работы крепления	Механизм разрушения	Ω (ASD)	Φ (LRFD)
Растяжение	Разрушение по поперечному сечению стержня	2,65	0,6
	Вырыв дюбель-гвоздя из основания	4,0	0,4
	Прорыв прикрепляемого элемента	3,0	0,5

Анализ расчетных положений отечественных стандартов выявил следующие области для их совершенствования:

- область применения обоих сводов правил должна быть уточнена. Выявлены как противоречия внутри самих стандартов, так и требования к материалу дюбелей, которые не могут быть выполнены современными производителями.

- терминология и условные обозначения должны быть приведены в соответствие с принятыми в СП 16.13330.2017 [20].

- подход к расчету креплений должен быть унифицирован и, возможно, объединен в один стандарт для избежания дублирования. В настоящее время отмечается наличие избыточных, либо некорректных коэффициентов надежности, и уравнений, заимствованных из методики расчета болтовых соединений.

Ввиду того, что в некоторых аспектах расчета дюбельных соединений зарубежные стандарты имеют существенные отличия, возникает задача по определению и сравнению запасов прочности по различным механизмам разрушения, рассчитанным по рассматриваемым нормам.

Материалы и методы

Для проверки рассмотренных методик расчета были использованы данные лабораторных испытаний 5 типов дюбель-гвоздей производства компании Hilti. Дюбель-гвозди X-HSN, X-ENP и X-ENP2k предназначены для крепления стальных профилированных настилов к стальным конструкциям различной толщины и имеют прижимную шайбу, препятствующую прорыванию тонких прикрепляемых листов при отрыве настила. Дюбель-гвозди X-R и X-U предназначены для крепления конструктивных элементов повышенной толщины (Таблица 4). Данные о нормативных сопротивлениях вырыву и срезу в Таблице 4 представлены на основании Руководства по технологии прямого монтажа Hilti [4].

Таблица 4

Характеристики рассматриваемых дюбель-гвоздей

Table 4

Properties of the investigated powder-actuated pins

Марка	Прочность стали, МПа	HRC	L, мм	t ₁ , мм	t ₂ , мм	d, мм	d _н , мм	Нормативное сопротивление растяжению, кН
X-ENP2k	>750	57	25,5	0,75–1,5	3–6	3,7	15,0	8,8
X-R	>2000	57	14,0	0,75–3,0	3–8	3,7	8,0	2,2
X-HSN24	>590	55	24,0	0,6–1,5	3–9.5	3,75	12,0	3,9
X-U	>660	46	16,0	0,75–1,25	≥6	4,0	8,0	2,0
X-ENP	>750	57	23,8	0,6–2,5	≥6	4,5	15,0	8,8

Испытания креплений на растяжение, приведенные в Таблице 6, выполнены автором при поддержке сотрудников лабораторий ИСМИиК (НИУ МГСУ), а также рассмотрены данные других исследователей [21, 22]. Данные статистически обработаны и приведены к расчетным значениям с применением коэффициента Оуэна для обеспеченности 0,95 при достоверности 90 % [23]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum(N_i - N_{cp})^2}{n - 1}},$$
$$v = \frac{S}{N_{cp}},$$
$$N_{Rd} = \frac{N_{cp}(1 - t \cdot v)}{\gamma_m},$$

где N_{cp} – среднее значение разрушающей нагрузки, определенное по серии испытаний без учета выпадающих результатов, кН;
 N_i – единичное значение нагрузки в серии результатов испытаний, кН;
 n – число результатов в серии испытаний;
 S – среднее квадратическое отклонение единичных значений нагрузки, кН;
 v – коэффициент вариации v ;
 t – коэффициент Оуэна для нижней границы несущей способности крепежного элемента в соответствии с Таблицей 5.

Таблица 5

Коэффициенты Оуэна

Table 5

Owen's statistical factors

Число результатов испытаний, n	Значение коэффициента, t
5	3,400
6	3,091
7	2,894
8	2,755
9	2,649
10	2,568

Таблица 6

Результаты испытаний образцов

Table 6

Test results of the specimens

№	Шифр серии испытаний	Крепежный элемент			Базовый материал		Прикрепляемый материал		Результаты испытаний	
		Марка	R_{un} , МПа	HRC	t_2 , мм	R_{un} , МПа	t_1 , мм	R_{un} , МПа	F_{test} , кН	Механизм разрушения
1	P-ENP2k-3-0.7	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,7	290	3,8	Б + В
2	P-ENP2k-3-0.8	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,8	290	5,5	Б + В
3	P-ENP2k-5-0.7	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,7	290	4,1	В
4	P-ENP2k-5-0.8	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,8	290	6,1	В
5	P-ENP2k-5-0.9	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,9	290	6,5	В
6	P-ENP2k-5-1	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	1,0	290	7,3	В
7	P-ENP2k-5-1.2	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	1,2	290	7,5	В
8	P-R-6-3	X-R 14	2123	57,6	5,9	448	3,0	431	12,4	Б
9	P-HSN-3-1.9	X-HSN24	590	55,4	3,2	400	1,9	401	7,0	Б
10	P-HSN-5-1.9	X-HSN24	590	55,9	4,8	438	1,9	401	11,1	Б + В
11	P-HSN-10-0.7	X-HSN24	590	55,9	9,5	448	0,7	409	5,5	В
12	P-HSN-10-0.9	X-HSN24	590	55,4	9,5	448	0,9	415	6,3	В
13	P-HSN-10-1.2	X-HSN24	590	55,9	9,5	448	1,2	413	8,5	В
14	P-HSN-10-1.5	X-HSN24	590	55,3	9,5	448	1,5	399	8,6	В
15	P-HSN-10-1.9	X-HSN24	590	55,5	9,5	448	1,9	401	12,2	В
16	P-U-3-2.9	X-U 16	765	45,5	3,2	331	2,9	336	3,3	Б
17	P-U-6-3	X-U 16	669	57,9	5,9	448	3,0	431	7,1	Б
18	P-ENP-6-0.5	X-ENP 19	669	57,9	5,9	448	0,5	290	1,5	В
19	P-ENP-6-0.5	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,5	290	1,2	В
20	P-ENP-6-0.7	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,7	290	2,6	В
21	P-ENP-6-0.8	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,8	290	3,1	В
22	P-ENP-6-0.9	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	0,9	290	5,1	В
23	P-ENP-6-1.2	X-ENP 19	783	57,7	6,0	437	1,2	290	7,5	В
24	P-ENP-6-2	X-ENP 19	785	57,3	5,9	448	2,0	380	9,4	Б
25	P-ENP-6-3	X-ENP 19	785	57,3	5,9	448	3,0	431	7,6	Б
26	P-ENP2k-3-0.7	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,7	290	3,8	Б + В
27	P-ENP2k-3-0.8	X-ENP2k	763	57,7	3,0	413	0,8	290	5,5	Б + В
28	P-ENP2k-5-0.7	X-ENP2k	763	57,7	5,0	446	0,7	290	4,1	В

Примечание: для описания механизмов разрушения (МР) использованы следующие условные обозначения:
Б – Вырыв крепежного элемента из основания;
В – Прорыв прикрепляемого элемента.

При анализе результатов испытаний стоит отметить, что ни одного разрушения вследствие разрыва крепежного элемента зафиксировано не было: для образцов с толщиной прикрепляемого материала более 2 мм и нормативным сопротивлением стали >400 МПа

характерен вырыв дюбеля из основания (рис. 6а). Для образцов с меньшей толщиной при-
крепляемого материала и/или прочностью характерен прорыв прикрепляемого материала
через шляпку гвоздя (рис. 6б), либо смешанный тип (вырыв + прорыв).



Рис. 6. Характерные механизмы разрушения в испытанных образцах
Fig. 6. Typical failure modes observed in the tested specimens

Далее для испытанных образцов были вычислены расчетные значения прочности
креплений по СП 294.13330.2017, СП 260.13330.2023, AISI S100-24 (Таблица 7). Расчеты
креплений по EN 1993-1-1:2005 не приводятся, так как его методика расчета идентична
СП 260.13330.2023.

Таблица 7

Расчетная прочность креплений для испытанных образцов

Table 7

Calculated strength of fastenings for the tested specimens

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний		СП 294.13330.2017			СП 260.13330.2023			AISI S100-24		
		F_{test} , кН	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP
1	P-ENP2k-3-0.7	3,8	Б + В	2,07	46 %	В	2,44	64 %	В	3,05	80 %	В
2	P-ENP2k-3-0.8	5,5	Б + В	2,07	38 %	В	2,78	50 %	В	3,48	63 %	В
3	P-ENP2k-5-0.7	4,1	В	2,44	60 %	В	2,44	60 %	В	3,05	75 %	В
4	P-ENP2k-5-0.8	6,1	В	2,78	46 %	В	2,78	46 %	В	3,48	57 %	В
5	P-ENP2k-5-0.9	6,5	В	3,13	48 %	В	3,13	48 %	В	3,52	54 %	Б
6	P-ENP2k-5-1	7,3	В	3,48	48 %	В	3,48	48 %	В	3,52	48 %	Б
7	P-ENP2k-5-1.2	7,5	В	3,73	50 %	В	4,18	55 %	В	3,52	47 %	Б
8	P-R-6-3	12,4	Б	1,76	14 %	А=Б	1,76	14 %	А=Б	0,88	7 %	Б
9	P-HSN-3-1.9	7,0	Б	2,15	31 %	А=Б	3,10	44 %	А=Б	1,55	22 %	Б
10	P-HSN-5-1.9	11,1	Б + В	3,10	28 %	А=Б	3,10	28 %	А=Б	1,55	14 %	Б
11	P-HSN-10-0.7	5,5	В	2,87	52 %	В	2,87	52 %	В	1,55	28 %	Б
12	P-HSN-10-0.9	6,3	В	3,10	49 %	А=Б	3,10	49 %	А=Б	1,55	25 %	Б
13	P-HSN-10-1.2	8,5	В	3,10	36 %	А=Б	3,10	36 %	А=Б	1,55	18 %	Б
14	P-HSN-10-1.5	8,6	В	3,10	36 %	А=Б	3,10	36 %	А=Б	1,55	18 %	Б
15	P-HSN-10-1.9	12,2	В	3,10	25 %	А=Б	3,10	25 %	А=Б	1,55	13 %	Б
16	P-U-3-2.9	3,3	Б	1,60	49 %	А=Б	1,60	49 %	А=Б	0,80	24 %	Б
17	P-U-6-3	7,1	Б	1,60	23 %	А=Б	1,60	23 %	А=Б	0,80	11 %	Б

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний		СП 294.13330.2017			СП 260.13330.2023			AISI S100-24		
		F_{test} , кН	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	MP
18	P-ENP-6-0.5	1,5	В	1,74	115 %	В	1,74	115 %	В	2,18	144 %	В
19	P-ENP-6-0.5	1,2	В	1,74	151 %	В	1,74	151 %	В	2,18	188 %	В
20	P-ENP-6-0.7	2,6	В	2,44	92 %	В	2,44	92 %	В	3,05	115 %	В
21	P-ENP-6-0.8	3,1	В	2,78	90 %	В	2,78	90 %	В	3,48	113 %	В
22	P-ENP-6-0.9	5,1	В	3,13	61 %	В	3,13	61 %	В	3,52	69 %	Б
23	P-ENP-6-1.2	7,5	В	4,18	56 %	В	4,18	56 %	В	3,52	47 %	Б
24	P-ENP-6-2	9,4	Б	5,33	57 %	А=Б	7,04	75 %	А=Б	3,52	37 %	Б
25	P-ENP-6-3	7,6	Б	5,33	71 %	А=Б	7,04	93 %	А=Б	3,52	47 %	Б

Примечание: для описания механизмов разрушения (MP) использованы следующие условные обозначения:
А – Разрыв крепежного элемента;
Б – Вырыв крепежного элемента из основания;
В – Прорыв прикрепляемого элемента.

Результаты

Сравнение результатов испытаний креплений на растяжение с расчетной прочностью приведено на рис. 7. На графике видно, что для большинства образцов все три стандарта дают достаточно большой запас по прочности (15 % до 88 %), кроме серий с толщиной прикрепляемого материала 0,5 мм. Для двух серий P-ENP-6-0.5 разница между с результатами испытаний и расчетом составила более 15 %, что является неприемлемым для инженерной методики. Для образцов с дюбелем X-ENP и толщиной прикрепляемого материала 0,7–0,8 мм результаты расчета по отечественным стандартам показали запас прочности 8–10 %, в то время, как результат по AISI S100-24 оказался ниже значения, полученного в результате испытаний.

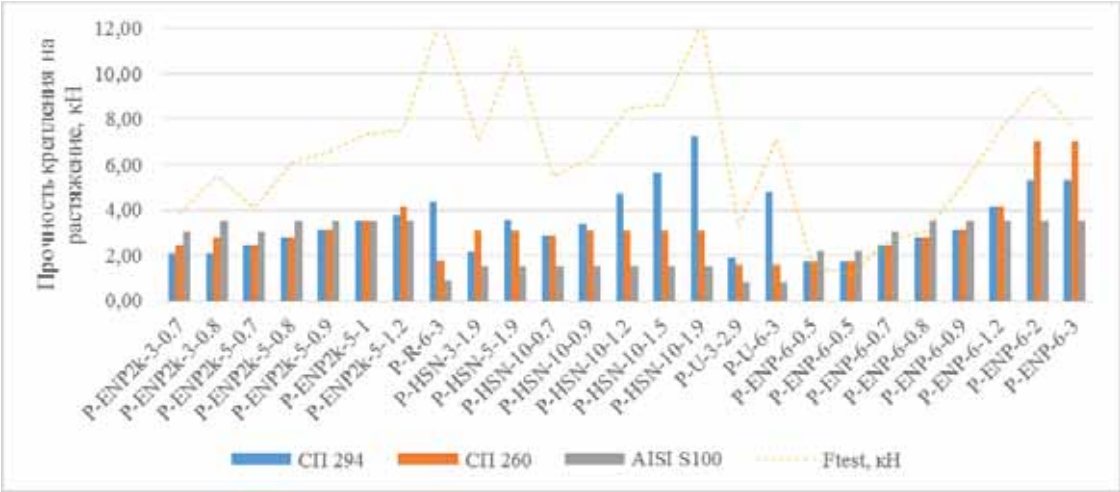


Рис. 7. Сравнение результатов испытаний образцов с расчетными значениями
Fig. 7. Comparison of Test Results with Calculated Values

Крепления в ряде серий (P-R-6-3, P-HSN-3-1.9, P-U-3-2.9, P-U-6-3, P-ENP-6-2 и P-ENP-6-3) разрушились вследствие вырыва дюбеля из основания. Стандарты СП 260.13330.2023 и AISI S100-24 не дают аналитической методики для оценки проч-

ности анкеровки дюбеля в основании и используют для проверки данные испытаний, в то время как в СП 294.13330.2017 предложена формула, устанавливающая зависимость между прочностью и толщиной стального основания, диаметром дюбеля и его сопротивлением вырыву. Выполним сравнение результатов испытаний с расчетными значениями сопротивления дюбеля вырыву по СП 294.13330.2017 и СП 260.13330.2023. Данные по AISI S100-24 не приводятся, поскольку отличаются от СП 260.13330.2023 только коэффициентом надежности.

Таблица 8

Сравнение результатов (серии с вырывом дюбеля из основания)

Table 8

Comparison of results for the fastener pullout failure series

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний	СП 294.13330.2017		СП 260.13330.2023	
		F_{test} , кН	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}
1	P-R-6-3	12,40	4,38	0,35	1,76	0,14
2	P-HSN-3-1.9	7,00	2,15	0,31	3,10	0,44
3	P-U-3-2.9	3,27	1,90	0,58	1,60	0,49
4	P-U-6-3	7,11	4,74	0,67	1,60	0,23
5	P-ENP-6-2	9,40	5,33	0,57	7,04	0,75
6	P-ENP-6-3	7,55	5,33	0,71	7,04	0,93

На рис. 8 видно, что для представленной выборки аналитический подход дает более точный «прогноз» с достаточным запасом прочности (30–70 %) по отношению к фактическим значениям прочности. В то же время для серии P-ENP-6-3, разница между расчетным значением, полученным по СП 260.13330.2023 на основе «данных производителя» составила всего 7 %. Принимая во внимание, что для остальных серий запас сопоставим с результатами аналитического расчета, требуется уточнение методики оценки технических данных, публикуемых производителями.

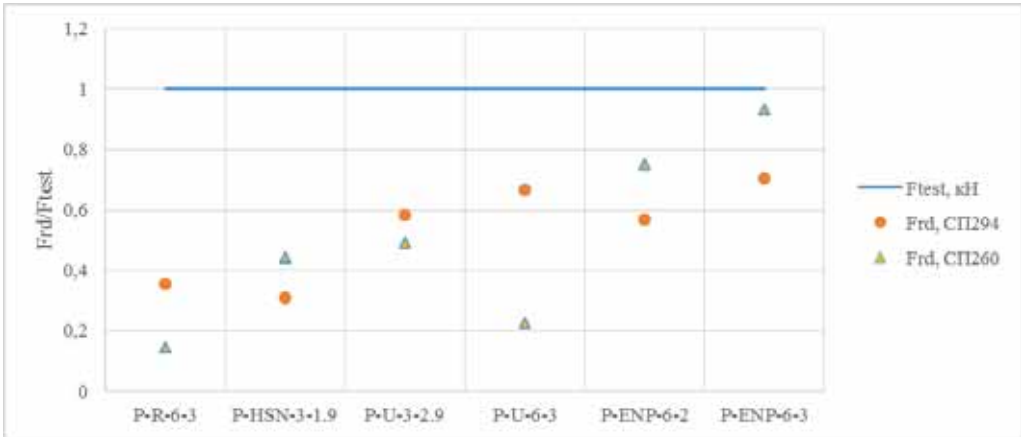


Рис. 8. Сравнение результатов испытаний образцов, разрушившихся вследствие вырыва дюбеля из основания, с расчетными значениями

Fig. 8. Comparison of experimental results and calculated values for specimens failing by fastener pullout from the base material

В Таблице 9 представлены результаты испытаний серий, разрушившихся вследствие прорыва листа через головку дюбеля и их «теоретическая прочность». Значения для СП 260.13330.2023 и СП 294.13330.2017 приведены в одной колонке, поскольку имеют идентичные уравнения и коэффициент надежности для данного механизма разрушения.

Таблица 9

Сравнение результатов (серии с прорывом листа через головку дюбеля)

Table 9

Comparison of results for the sheet pull-over failure series

№	Шифр серии испытаний	Результаты испытаний	СП 294.13330.2017, СП 260.13330.2023		AISI S100-24	
		F_{test} , кН	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}	F_{rd} , кН	F_{rd} / F_{test}
1	P-ENP2k-3-0.7	3,81	2,44	0,64	3,05	0,80
2	P-ENP2k-3-0.8	5,52	2,78	0,50	3,48	0,63
3	P-ENP2k-5-0.7	4,07	2,44	0,60	3,05	0,75
4	P-ENP2k-5-0.8	6,07	2,78	0,46	3,48	0,57
5	P-ENP2k-5-0.9	6,54	3,13	0,48	3,92	0,60
6	P-ENP2k-5-1	7,29	3,48	0,48	4,35	0,60
7	P-ENP2k-5-1.2	7,53	4,18	0,55	5,22	0,69
8	P-HSN-5-1.9	11,06	7,23	0,65	9,04	0,82
9	P-HSN-10-0.7	5,49	2,87	0,52	3,58	0,65
10	P-HSN-10-0.9	6,26	3,41	0,54	4,27	0,68
11	P-HSN-10-1.2	8,49	4,69	0,55	5,87	0,69
12	P-HSN-10-1.5	8,65	5,60	0,65	7,00	0,81
13	P-HSN-10-1.9	12,23	7,23	0,59	9,04	0,74
14	P-ENP-6-0.5	1,51	1,74	1,15	2,18	1,44
15	P-ENP-6-0.5	1,15	1,74	1,51	2,18	1,88
16	P-ENP-6-0.7	2,64	2,44	0,92	3,05	1,15
17	P-ENP-6-0.8	3,09	2,78	0,90	3,48	1,13
18	P-ENP-6-0.9	5,14	3,13	0,61	3,92	0,76
19	P-ENP-6-1.2	7,52	4,18	0,56	5,22	0,69

На рис. 9 видно, что кроме описанных выше серий P-ENP-6-0.5, P-ENP-6-0.7, P-ENP-6-0.8 американский стандарт оказывается точнее на 11–16 %. Ввиду того, что все рассмотренные образцы включали в себя специализированные дюбель-гвозди для крепления тонкого настила с характерной прижимной шайбой, оценить влияние коэффициента α , примененного в AISI S100-24 на точность прогноза не представляется возможным.

На основании проведенного выше анализа можно сделать вывод о том, что методика расчета дюбельных соединений по СП 294.13330.2017 для представленной выборки из 25 серий дает наибольшую точность в определении реальной несущей способности дюбельного соединения. Несмотря на то, что область применения стандарта с точки зрения толщины прикрепляемого материала ограничена $t_1 \geq 1,5$ мм, результаты анализа показывают, что она может применяться вплоть до $t_1 > 0,8$ мм. В данном диапазоне указанная методика дает запас 29–69 % по отношению к результатам испытаний.

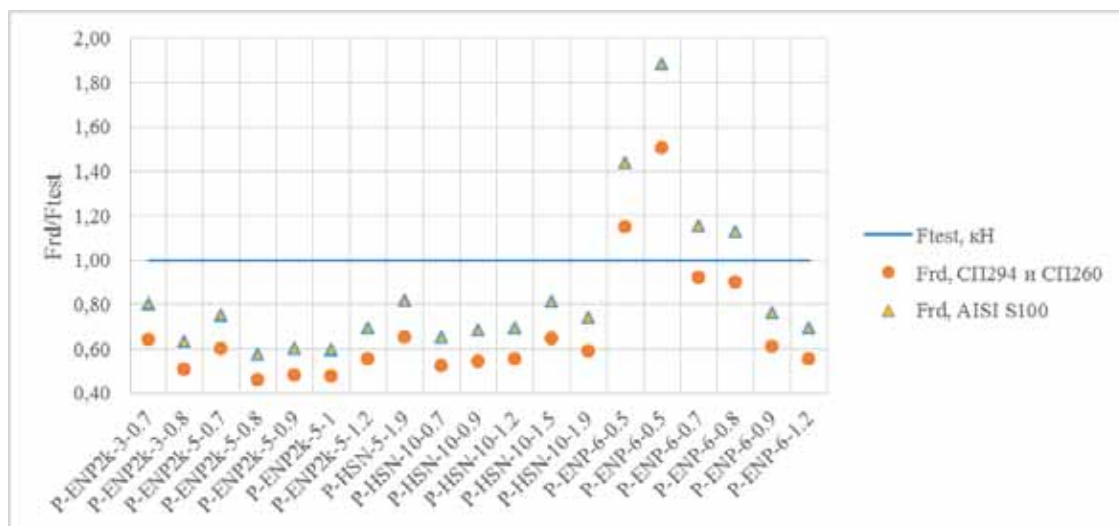


Рис 9. Сравнение результатов испытаний образцов, разрушившихся вследствие прорыва листа через головку дюбеля, с расчетными значениями

Fig. 9. Comparison of experimental results with calculated values for specimens that failed by sheet pull-over

Ключевым недостатком методики, описанной в СП 294.13330.2017, является избыточность всевозможных коэффициентов, которые ввиду отсутствия вариативности, могут быть приведены к константам. Также отмечена путаница в терминах и индексах некоторых величин, которые затрудняют практическое применение методики. При этом в стандарте отсутствует проверка крепления по прочности крепления по поперечному сечению стержня.

Несмотря на указанные недостатки, методика СП 294.13330.2017 в случае расширения области применения на крепление ЛСТК может полностью заменить собой положения СП 260.13330.2023 по расчету дюбельных соединений. Дальнейшее развитие методики возможно по пути уточнения факторов, влияющих на прочность анкеровки дюбеля в основании и учет вклада прижимной шайбы при расчете крепления на прорыв прикрепляемого листа, особенно при его толщине 0,5–0,8 мм.

Выводы

1. Надежность дюбельных соединений металлических конструкций при работе на статические растягивающие нагрузки обеспечивается несколькими взаимодополняющими механизмами анкеровки крепежного элемента в основании. Наибольший вклад в прочность крепления оказывает сила трения между стержнем дюбеля и материалом основания. В отдельных случаях на прочность крепления оказывают влияние эффект спайки цинкового покрытия дюбеля с основанием и эффект микрозащемления насечек на стержне дюбеля, однако оценить их вклад аналитически сложно.

2. Разрушение дюбельного соединения металлических конструкций при работе на растягивающие нагрузки возможно вследствие одного из трех механизмов разрушения: разрушения по поперечному сечению стержня, включая отрыв головки или шайбы; вырыв дюбель-гвоздя из основания и прорыв прикрепляемого элемента. Наступление того или иного механизма разрушения зависит главным образом от толщины и

прочности скрепляемых металлических элементов. При креплении тонких стальных элементов толщиной до 1,5 мм существенное влияние на прочность оказывает конструкция дюбеля, которая при наличии прижимной шайбы имеет повышенное сопротивление прорыву листа.

3. Рассмотрены два российских, европейский и американский стандарты по проектированию металлических конструкций, имеющих положения по расчету дюбельных соединений. Несмотря на единство в подходе, во всех стандартах были выявлены различия в области применения и особенности, влияющие на результат расчета. Для проверки результатов расчета были использованы данные испытаний 25 серий лабораторных испытаний креплений стальных конструкций на растяжение. Для испытаний были использованы 5 типов дюбель-гвоздей различной конфигурации, диапазон толщин прикрепляемых элементов составил 0,5–3 мм, диапазон толщин базовых материалов: 3–6 мм.

4. По результатам анализа было установлено, что методика СП 294.13330.2017 дает наиболее точные результаты расчета в пределах своей области применения, которая может быть расширена по результатам данного исследования. Установлено, что при понижении минимально допустимой толщины прикрепляемого листа с 1,5 до 0,8 мм указанная методика дает запас 29–69 % по отношению к результатам испытаний. Таким образом становится возможно ее применение для расчета элементов кровли из стального профилированного настила.

Список литературы

1. Beck H., Siemers M., Reuter M., Schöffendt E. Powder-actuated fasteners and fastening screws in steel construction. *Steel Construction Calendar*, 2019, pp. 16–24.
2. Рихтер Д.А., Иовенко А.А., Ершов М.Н., Проектирование сталежелезобетонных перекрытий по стальному профилированному настилу с применением анкерных упоров X-HVB // *Технология и организация строительного производства*. 2013. № 4(5). С. 17–22. EDN: RYHSKX
3. Kishiki S., Apriyadi A. J., Tatsumi N., Watahabe E., Okada Y., Hasebe M. Application of power actuated fasteners to framing components: joint strength of steel deck with power actuated fasteners. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, 2021, no. 86(779), pp. 135–144. DOI: 10.3130/aijs.86.135
4. Руководство по технологии прямого монтажа Hilti / Hilti AG, Шаан, Лихтенштейн/ 2025. С. 341.
5. ETA-08/0040 – Power actuated fasteners: HSB 14, HSB 14 Tube and HSB 14 Strip, SPIT, 2018. 9 с.
6. Каталог продукции Simpson Strong-Tie, C-A-2023 / Simpson Strong-Tie, Плесантон, 2023. 250 с.
7. СП 70.13330.2012 Несущие и ограждающие конструкции [с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5, 6], 2023.
8. Бирюков М.А., Песин А.М., Чукин М.В., Картунов А.Д., Бакшинов В.А., Бирюков А.В., Разработка импортозамещающей технологии производства дюбель-гвоздей на основе численного моделирования методом конечных элементов // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2016. Т. 14. № 1. С. 52–59. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59.
9. Ступин Д.А. Совершенствование способов соединения металлических конструкций дюбелями // *XL// Гагаринские чтения*. 2016. С. 77–78.
10. Roy K., Cao Hung Pham. Power-actuated fasteners in single shear. An experimental investigation and proposed design rules. *Engineering Structures*, 2022, no. 259, pp. 66–124. DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114124
11. Beck H., Engelhardt M., Glaser N. Static Pullout Strength of Power Actuated Fasteners in Steel: State-of-the-Art Review. *Engineering Journal*, 2023, no. 2, pp. 99–110.
12. Гальчун И.А., Садкин К.Е., Назарова Е.Д. Циклическая трещиностойкость высокопрочных сталей, склонных к водородному охрупчиванию, в коррозионной среде // *Труды Крыловского государственного научного центра. Специальный выпуск*. 2021. № 2. С. 126–131.
13. Катранов И.Г., Кунин Ю.С., Экспериментальные исследования работы вытяжных заклепок и винтов в соединениях ЛСТК // *Наука и безопасность*. 2011. № 2. С. 62–68.

14. Ubejd Mujagic J.R., Green P.S., Gould W.G. Strength Prediction Model for Power Actuated Fasteners Connecting Steel Members in Tension and Shear-north American Applications. *20st International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2010, pp. 551–574.
15. СП 260.13330.2023 Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования, 2023.
16. СП 294.1325800.2017 Конструкции стальные. Правила проектирования (с Изменениями № 1, 2, 3, с Поправкой), 2023.
17. EN1993-1-1:2005/AC:2009 Eurocode 3 – General rules and rules for buildings, 2022.
18. AISI S100-24 – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – 2024.
19. Sabelli R., Ziemian R.D., Schafer B.W. ASD and LRFD lateral load combinations: Comparison of required strength and reliability for design of structural steel. *Journal of Constructional Steel Research*, 2024, no. 212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108326
20. СП 16.13330.2017 Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Поправками, с Изменениями № 1–6), 2024.
21. Кудрявцев М.В. Испытание дюбель-гвоздей в образцах стали различной толщины. *Сборник докладов научно-технической конференции по итогам научно-исследовательских работ студентов института строительства и архитектуры НИУ МГСУ*. 2018. С. 986–988.
22. Truong A.N., Pham C.H., Hancock G.J. Power-Actuated Fasteners Connecting Cold-Formed Sheet Steels under Monotonic Tension Loading. *Journal of Structural Engineering*, 2021, vol. 147, no. 3, article 04020361. DOI: 10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002920
23. Оуэн Д.Б., Сборник статистических таблиц [Текст] / Обработка таблиц Л.С. Барк; Пер. с англ. Л.Н. Большева и В.Ф. Котельниковой; М.: АН СССР. Матем. ин-т им. В.А. Стеклова, 1966. 586 с.

References

1. Beck H., Siemers M., Reuter M., Schöffendt E. Powder-actuated fasteners and fastening screws in steel construction. *Steel Construction Calendar*, 2019, pp. 16–24.
2. Rihter D.A., Iovenko A.A., Ershov M.N. Designing of permanent steel decking slabs with X-HVB anchor technology. *Technology and Organization of Construction Production*, 2013, no. 4(5), pp. 17–22 (In Russian). EDN: RYHSKX
3. Kishiki S., Apriyadi A.J., Tatsumi N., Watahabe E., Okada Y., Hasebe M. Application of power actuated fasteners to framing components (part 1): joint strength of steel deck with power actuated fasteners. *Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ)*, no. 86(779), pp. 135–144, 2021. DOI: 10.3130/aijs.86.135
4. Hilti AG, Direct fastening technology manual, *Schaan, Liechtenstein*, 2025.
5. ETA-08/0040 – Power actuated fasteners: HSBR 14, HSBR 14 Tube and HSBR 14 Strip, *SPIT*, 2018.
6. Simpson Strong-Tie, C-A-2023. Anchoring, Fastening, *Restoration and Strengthening Systems for Concrete and Masonry*, *Pleasanton*, 2023.
7. СП 70.13330.2012 Load-bearing and separating constructions (with revisions no. 1, 2, 3, 4, 5, 6), 2023 (In Russian).
8. Biryukov M.A., Pesin A.M., Chukin M.V., Kartunov A.D., Bakshinov V.A., Biryukov A.V. Development of import-substituting technology for the production of dowel nails based on numerical finite element modeling. *Vestnik of Novosibirsk State Technical University*, 2016, vol. 14, no.1, pp. 52–59, 2016. DOI:10.18503/1995-2732-2016-14-1-52-59 (In Russian).
9. Stupin D.A. Improving the methods of connecting metal structures with dowels. *XLII Gagarinskies chteniya*, 2016, pp. 77–78.
10. Roy K., Cao Hung Pham, Pham C.H. Power-actuated fasteners in single shear- An experimental investigation and proposed design rules. *Engineering Structures*, 2022, no. 259, pp. 66–124, DOI: 10.1016/j.engstruct.2022.114124
11. Beck H., Engelhardt M., Glaser N. Static Pullout Strength of Power Actuated Fasteners in Steel: *State-of-the-Art Review*. *Engineering journal*, 2003, no. 2, pp. 99–110.
12. Galchun I., Sadkin K., Nazarova Ye. Fatigue crack toughness of high-strength steels prone to hydrogen embrittlement in corrosive environment. *Transactions of the Krylov State Research Centre. Special Issue 2*, 2021, pp. 126–131. (In Russian).

13. Katranov I.G., Kunin Yu.S. Experimental studies of the operation of exhaust rivets and screws in LSTC joints. *Nauka i bezopasnost*, 2011, no. 2, pp. 62–68. (In Russian).
14. Ubejd Mujagic J.R., Green P.S. Gould W.G. Strength Prediction Model for Power Actuated Fasteners Connecting Steel Members in Tension and Shear—North American Applications. *20th International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures*, 2010, pp. 551–574.
15. SP 260.13330.2023 – Cold-formed thin-walled steel profile and galvanized corrugated plate constructions. *Design rules*, 2023. (In Russian).
16. SP 294.1325800.2017 Steel Structures. Design rules (with revisions no. 1, 2, 3, with amendment), 2023. (In Russian).
17. EN1993-1-2:2005/AC:2009 Eurocode 3 – General rules and rules for buildings, 2022. AISI S100-24 – *North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members*, 2024.
18. AISI S100-24 – North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members – 2024.
19. Sabelli R., Ziemian R.D., Schafer B.W. ASD and LRFD lateral load combinations: Comparison of required strength and reliability for design of structural steel. *Journal of Construction Steel Research*, 2024, no. 212. DOI: 10.1016/j.jcsr.2023.108326
20. SP 16.13330.2017 – Steel Structures. Updated edition of SNiP II-23-81* (with Amendments and Revisions no. 1–6), 2024. (In Russian).
21. Kudryavtsev M.V. Testing dowel nails in steel samples of various thicknesses. *Collection of reports of a scientific and technical conference on the results of research work by students of the Institute of Construction and Architecture NRU MSTU*, 2018, pp. 986–988. (In Russian).
22. Truong A.N., Pham C.H., Hancock G.J. Power-Actuated Fasteners Connecting Cold-Formed Sheet Steels under Monotonic Tension Loading. *Journal of Structural Engineering*, 2021, vol. 147, no. 3, article 04020361. DOI:10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0002920
23. Owen D.B. Collection of statistical tables [Text] / Processing tables by L.S. Bark ; Translated from English by L.N. Bolshev and V.F. Kotelnikova; 586 p. Moscow: USSR Academy of Sciences. Matem. V.A. Steklov Institute, 1966.

Информация об авторе / Information about the author

Чесноков Денис Александрович, канд. техн. наук, инженер по стандартизации и сертификации, независимый исследователь. Москва

SPIN-код: 1405-2285, ORCID: 0000-0002-4620-4442; Chesnokovdenis23@gmail.com.

Denis A. Chesnokov, Cand. Sci. (Engineering), Codes and Approvals engineer, Independent researcher. Moscow

СОВРЕМЕННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ

Н.Г. СЕРЕГИН¹

¹Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, 26, Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В европейских странах наблюдается рост использования деревянных конструкций не только для малоэтажного строительства, но и для возведения многоэтажных зданий. При строительстве многоэтажных зданий из древесины часто сталкиваются с проблемой создания изделий с уникальными геометрическими и конструкционными характеристиками, которые невозможно изготовить из стандартных пиломатериалов.

Цель. Исследование современных строительных конструкций с применением панелей CLT и МНМ в промышленном и гражданском строительстве для возведения многоэтажных зданий и сооружений, изучение возможных конструктивных решений, рассмотрение технических характеристик конструкций.

Материалы и методы. Предметом данного исследования являются современные строительные конструкции из древесины на основе технологий CLT и МНМ, используемых для изготовления уникальных несущих конструкций в строительстве зданий.

Результаты. В работе приведены технические характеристики панелей для строительства деревянных сооружений. Рассмотрены примеры реализованных и реализуемых зданий и сооружений.

Выводы. Сформулированы основные различия производственных решений. Проанализированы основные перспективы применения деревянного многоэтажного строительства. Сформулированы основные преимущества и недостатки панелей CLT и МНМ.

Ключевые слова: CLT, Cross Laminated Timber, перекрестно клееная древесина, перекрестное склеивание, Gro Thermo, МНМ, Massiv-Holz-Mauer, многослойный хвойный массив, характеристики панелей, достоинства, недостатки, перспективы применения панелей

Для цитирования: Серегин Н.Г. Современные строительные конструкции из древесины // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 48–58. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-48-58](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-48-58)
EDN: MSPXNT

Вклад автора

Автор берет на себя ответственность за все аспекты работы над статьей.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.01.2026

Поступила после рецензирования 20.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

MODERN BUILDING STRUCTURES MADE OF WOOD

N.G. SEREGIN¹

¹*National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), 26 Yaroslavskoye Shosse, Moscow, 129337, Russian Federation*

Abstract

Introduction. In European countries, the use of timber structures is growing, not only for low-rise construction but also for multi-story buildings. When constructing multi-story buildings using timber, one often encounters the challenge of creating products with unique geometric and structural characteristics that cannot be manufactured from standard lumber.

Aim. To study modern building structures using CLT and MHM panels in industrial and civil engineering for the construction of multi-story buildings and structures, to explore possible design solutions, and to examine the technical characteristics of the structures.

Materials and methods. The subject of this study is modern timber building structures based on CLT and MHM technologies used to produce unique load-bearing structures in building construction.

Results. The paper presents the technical characteristics of panels for the construction of timber structures. Examples of completed and future buildings and structures are considered.

Conclusions. The main differences in manufacturing solutions are outlined. The main prospects for the use of timber in multi-story construction are analyzed. The main advantages and disadvantages of CLT and MHM panels are outlined.

Keywords: CLT, Cross Laminated Timber, cross-glued wood cross-bonding, Gro Thermo, MHM, Massiv-Holz-Mauer, multilayer coniferous wood, panel characteristics, advantages, disadvantages, panel application prospects

For citation: Seregin N.G. Modern building structures made of wood. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2 (49), pp. 48–58. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-48-58](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-48-58) EDN: MSPXNT

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declare no conflict of interest.

Received 24.01.2026

Revised 20.02.2026

Accepted 05.03.2026

Введение

В европейских странах тенденции последних лет показывают рост использования деревянных конструкций не только для малоэтажного строительства, но и для возведения многоэтажных зданий. При строительстве многоэтажных зданий из древесины сталкиваются с проблемой создания изделий с уникальными геометрическими и конструктивными характеристиками, которые невозможно изготовить из стандартных пиломатериалов. Современное строительство постоянно находится в поиске инновационных решений, способных сочетать прочность, эстетику и энергоэффективность. Для решения данной

проблемы, а также многих других разрабатываются различные технологии изготовления деревянных конструкций.

В настоящий момент для решения указанной проблемы наибольшее распространение получила технология изготовления перекрестных стеновых панелей – *CLT*. Но наряду с данной технологией существует еще одна, которая имеет очень схожую конструкцию – *МНМ* [5, 6, 7].

Цель работы – исследование современных строительных конструкций с применением панелей *CLT* и *МНМ* в промышленном и гражданском строительстве для возведения многоэтажных зданий и сооружений, изучение возможных конструктивных решений, рассмотрение технических характеристик конструкций.

Объект исследования

С применением в современных строительных изделиях деревянных панелей *CLT* и *МНМ* строят различные здания и сооружения, такие как: отели, многоэтажные и общественные здания, частные дома, офисы, производственные и торговые комплексы [1, 2].

Строительство и применение панелей *CLT* и *МНМ* осуществляется с некоторыми технологическими особенностями, одной из которых является обязательная отделка фасадов здания материалами, не поддерживающими горение и защищающими их от атмосферных воздействий. Для обеспечения лучшей тепло и звукоизоляции необходимо тщательно герметизировать стыки между панелями (не допускать «мостков холода») [3, 4].

Пример конструктивной схемы многоэтажного здания с применением деревянных панелей *CLT* или *МНМ* представлен на рис. 1.

Основными несущими элементами рассматриваемой конструктивной схемы многоэтажного здания являются *CLT* или *МНМ* панели толщиной 160 мм, из которых изготовлены несущие стены 1 перекрытия 2. К несущим стенам через пароизоляционную мембрану 3 закреплен двойной слой теплоизоляционных плит 4 толщиной 50 мм и плотностью 100 кг/м³. Теплоизоляция выполнена из двух слоев плит Пеноплекса 5 толщиной 50 мм и плотностью 20–40 кг/м³. Выравнивание пола произведено стяжкой из легкого бетона 6 толщиной 60 мм, на который наносится напольное покрытие 7. Между панелями перекрытия 2 и нижним слоем плит Пеноплекса 5 проходят инженерные сети 8, включающие трубопроводы и электрические кабели. Межэтажную шумоизоляцию обеспечивают плиты 9 толщиной 100 мм и плотностью 40 кг/м³. К шумоизоляционным плитам 9 через пароизоляционную мембрану 10 закреплен чистовой потолок 11. Особенно необходимо обратить внимание на наличие шумоизоляционного демпфера 14, расположенного между плитами из *CLT* или *МНМ* панелей несущих стен 1 и плитами из *CLT* или *МНМ* панелей перекрытий 2, что существенно повышает комфортность проживания людей в здании.

Рассмотрим конструкции и технологии изготовления современных строительных элементов на базе деревянных *CLT* и *МНМ* панелей.

CLT (Cross Laminated Timber или ***Перекрестно Клееная Древесина***), другие названия: *KLH, BSP, X-LAM, CROSS-LAM* –это технология подразумевает изготовление панелей, в основу которой положено перекрестное склеивание между собой слоев ламелей из хвойных пород деревьев (рис. 2) [8, 9].

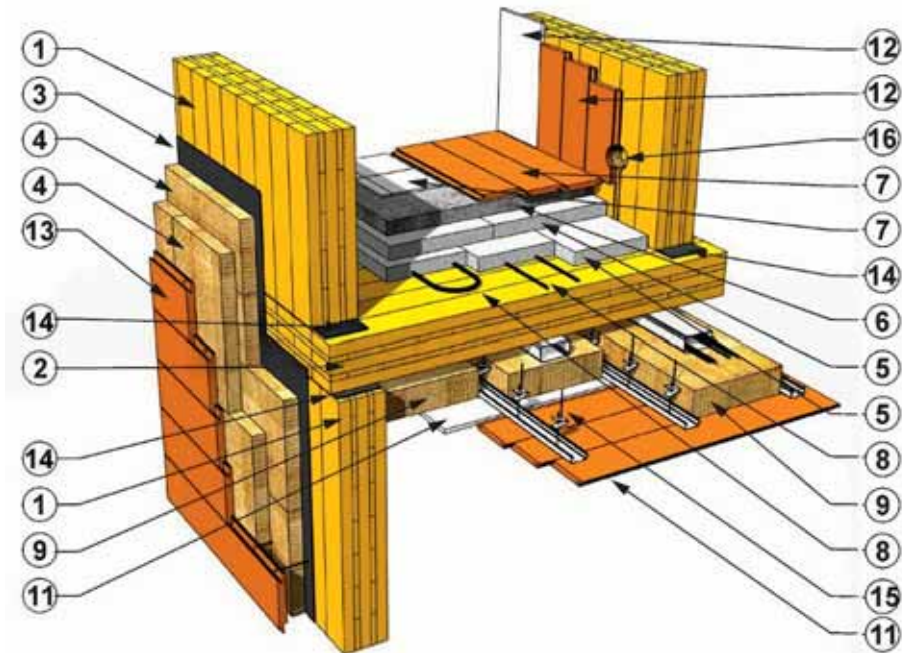


Рис. 1. Конструктивные схемы многоэтажного здания: 1. Несущая стена из CLT или MHM панелей толщиной 160 мм.; 2. Перекрытия из CLT или MHM панелей толщиной 160 мм.; 3. Пароизоляционная мембрана; 4. Теплоизоляционные плиты 2 x 50 мм, плотностью 100 кг/м³; 5. Пеноплекс 2 x 50 мм, плотностью 20–40 кг/м³; 6. Стяжка из легкого бетона толщиной 60 мм; 7. Напольное покрытие; 8. Сети; 9. Шумоизоляционные плиты 100 мм, плотностью 40 кг/м³; 10. Пароизоляционная мембрана; 11. Чистовой потолок; 12. Отделка интерьеров; 13. Фасадный материал; 14. Шумоизоляционный демпфер; 15. Подсистема чистового потолка; 16. Штробы

Fig. 1. Structural diagram of a multistorey building: 1. Loadbearing wall made of CLT or MHM panels 160 mm thick; 2. Floors made of CLT or MHM panels 160 mm thick; 3. Vapor barrier membrane; 4. Thermal insulation boards 2 x 50 mm, with a density of 100 kg/m³; 5. Penoplex 2 x 50 mm, with a density of 20–40 kg/m³; 6. Light concrete screed with a thickness of 60 mm; 7. Flooring; 8. Nets; 9. Sound insulation boards of 100 mm, with a density of 40 kg/m³; 10. Vapor barrier membrane; 11. Finished ceiling; 12. Interior decoration; 13. Facade material; 14. Noise-insulating damper; 15. Finishing ceiling subsystem; 16. Grooves



Рис. 2. Перекрестное склеивание панелей CLT
Fig. 2. Cross-gluing of CLT panels

Технология изготовления панелей была разработана в конце 1980-х годов и впервые использована в Германии и Австрии уже в начале 1990-х. Более широкие исследования данной технологии были проведены только после середины 1990-х годов [6, 7].

Уже к 2000-м годам производство многослойных клеёных деревянных панелей набрало большую популярность в европейских странах. Панели применяли для различных систем строительства одноэтажных и многоэтажных зданий [10, 11].

Для изготовления панелей *CLT* применяется доска хвойных пород древесины камерной сушки с влажностью 12 %. Она раскаивается на ламели необходимого сечения, которые сращиваются по длине. Далее ламели калибруются и собираются в щиты с послойным перекрёстным склеиванием. После чего щиты запрессовываются для получения единой панели, которая в дальнейшем проходит процесс калибровки, шлифовки и раскроя на ЧПУ станке [12].

Эти технологические операции необходимы для получения панелей с необходимыми геометрическими параметрами, сформированными проемами, а также технологическими отверстиями. За счёт перекрёстного склеивания получается панель с превосходными физико-механическими и теплоизоляционными свойствами, в отличие от традиционной древесины.

Габаритные размеры *CLT* панелей варьируются в диапазоне: ширина – до 4 м, длина – 24 м, а толщина – от 0,06 до 0,4 м [13].

Современное строительство постоянно находится в поиске инновационных решений. Так, наряду со стандартными панелями *CLT*, разработаны утепленные плиты *GrO Thermo*, применяемые для наружных стен.

GrO Thermo – это утепленная *CLT*-плита, часть внутренних ламелей которой замещена древесным утеплителем. Слой утеплителя вклеивается и запрессовывается в плиту аналогично ламелям [14].

Утеплитель, применяемый в панелях, на 94 % состоит из древесины, а также из экологического клея и парафина, которые добавляются для сохранения формы плиты (рис. 3).

Основные технические характеристики панелей *CLT* приведены в табл. 1 [15].

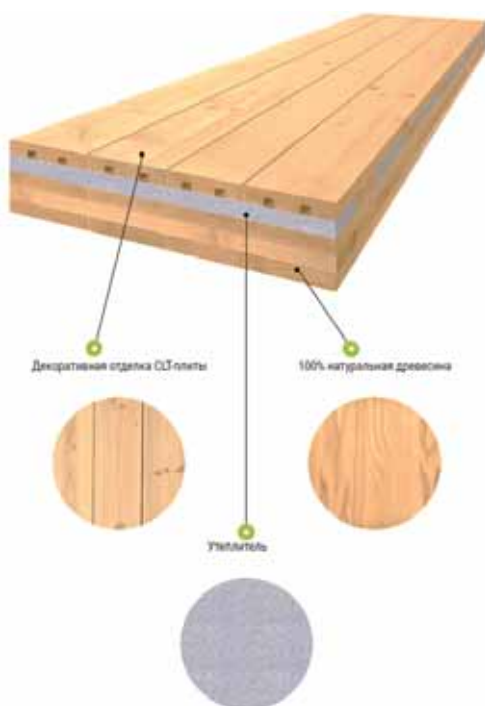


Рис. 3. Состав плит *GrO Thermo*
Fig. 3. Composition of *GrO Thermo* boards

Таблица 1

Основные технические характеристики панелей CLT

Table 1

Main technical characteristics of CLT panels

Показатели	Значения показателей
Влажность панелей	12 % (+/- 2 %)
Паропроницаемость поперек волокон	0,05 мг/(м*ч*Па)
Шумоизоляция	$R > 60$ дБ
Класс прочности	C24 (ГОСТ 33080-2014)
Теплопроводность	$\lambda = 0,13$ Вт/м*К (EN 12524)
Теплоёмкость	$c = 1,6$ кДж/(кг*К) (EN 12524)
Водостойкость	$\mu = 20-50$ (EN 12524)
Прочность на сжатие вдоль волокон	13–15 Н/мм ²
Прочность на сжатие поперек волокон	1,8 Н/мм ²
Прочность на изгиб	10 Н/мм ²
Расчетная нагрузка на стену	60 кН/м ²
на перекрытие	5 кН/м ²
Пожароустойчивость	D-s2, d0 (2003/43 / EC)
Огнестойкость	REI 60 – 120 (EN 1995-1-2-2004)
Скорость обугливания	0,65 мм / мин (EN 1995-1-2)
Масса изделия	470 – 480 кг/м ³

Примерами наиболее известных зданий и сооружений из CLT панелей являются:

- 100-метровая башня *Rocket&Tigerli* в Швейцарии: по плану, ее строительство должно завершиться в 2026 году.
- Комплекс *Mjostarnet* в Норвегии, насчитывающий 85,4 метра в высоту и 18–20 этажей.
- В России это ЖК «Соколики» в г. Сокол, 4-этажный комплекс, высотой 15 м и площадью 3013 м².

Рассмотрим технологию *МНМ* (*Massiv-Holz-Mauer* или *Многослойный Хвойный Массив*). Это панели, изготавливающиеся послойно с перехлестом из обрезных досок хвойных пород толщиной 20–24 мм (рис. 4) [16].



Рис. 4. Сечение панели МНМ
Fig. 4. Section of the MNM panel

Разработка панелей *МНМ* принадлежит немецкому исследователю Хансу Хундеггеру. В 2001 году он запустил производство из неделовой древесины 3–4 сорта. Уже в сентябре 2002 года был построен первый дом с использованием панелей *МНМ*.

В период с 2003 по 2019 годы в Германии из древесных плит было возведено около 300 объектов. Эта технология начала широко применяться в Европе, где она была использована для строительства как малоэтажных, так и высотных зданий.

В России *МНМ* технология появилась в 2007 году, но из-за недостатка информационной базы она не получила такой популярности, как *CLT*, что так же заметно и в наше время [17, 18].

Для производства стеновых панелей *МНМ* используется доска камерной сушки с влажностью 12 %, не требующая обработки антисептиком и пропитками.

Каждая доска проходит обработку на четырехстороннем станке компании Hundegger, где выпиливаются пазы, которые при соединении досок между собой образуют воздушную прослойку для высокой звукоизоляции и теплопроводности. Также на станке выпиливается боковой профиль для соединения досок между собой во избежание образования «мостиков холода». Затем доски послойно с перекрестной укладкой собираются в щиты с необходимыми размерами, которые сшиваются на алюминиевые гвозди в станках.

Выбор алюминиевых гвоздей (штифтов) обусловлен снижением повреждения и износа режущего инструмента при механической обработке.

Далее в программу ЧПУ вносятся необходимые геометрические размеры, проемы, а также технологические отверстия для труб отопления, канализации и электричества для раскроя панели.

По технологии изготовления панели являются экологически чистыми, без применения клея и других химических пропиток.

Производственная линия рассчитана на выпуск панелей с размерами: высота – 3,25 м, длина – до 6 м, толщина наружных панелей стен от 340 мм (15 слоев досок) до 160 мм (7 слоев), а внутренних составляет 160 или 115 мм [19, 20].

Основные технические характеристики панелей *МНМ* приведены в табл. 2 [21].

Таблица 2

Основные технические характеристики панелей *МНМ*

Table 2

Main technical characteristics of *MNM* panels

Показатели	Значения показателей
Влажность панелей	12 % (+/- 2 %)
Паропроницаемость поперек волокон	0,1–0,32 мг/(м*ч*Па)
Шумоизоляция	R= 48 дБ
Теплопроводность	$\lambda = 0,094$ Вт/м*К
Водостойкость	$\mu = 65$
Огнестойкость	F90B
Масса изделия	480 кг/м ³

Наиболее известными зданиями и сооружениями из *МНМ* панелей, являются:

- *SporX* в Норвегии, 40-метровое офисное здание, при строительстве которого использовано 2000 м³ цельной древесины и 500 м³ клееного бруса.
- Отель *Waldeck Spa Kur* в Бад-Дюрхайме.

Результаты

Панели *МММ* как и панели *CLT* имеют общую техническую особенность, связанную с обязательным применением отделочных материалов после монтажа конструкции.

- *Внутренняя отделка* (например, дерево, гипсокартон, штукатурка) монтируется непосредственно на панель.
- *Внешняя отделка* является частью фасада и рассчитывается исходя из необходимого значения теплопередачи наружной конструкции здания.

Отделка фасада может использоваться как с вентилируемым фасадом (рис. 5а), так и штукатурная (рис. 5б).

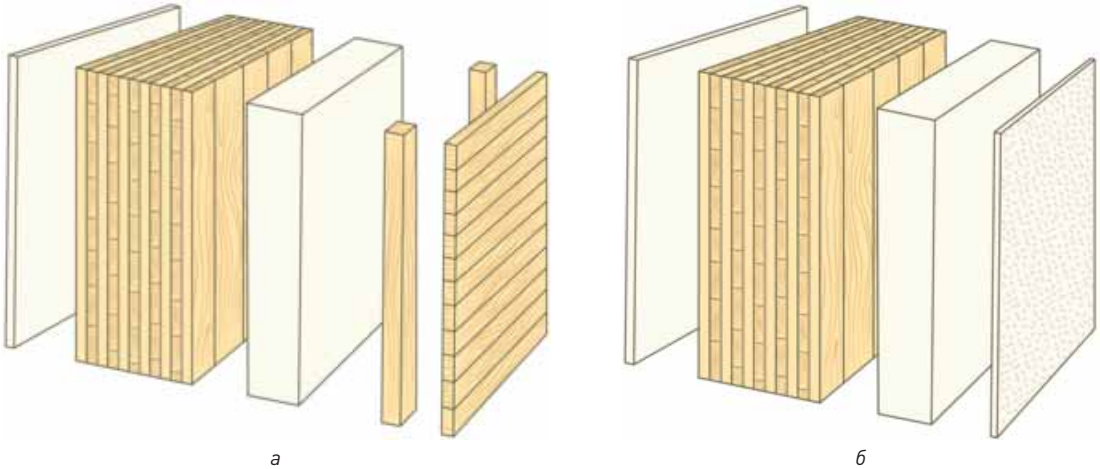


Рис. 5. Примеры отделки наружных панелей: а) вентилируемый фасад, б) штукатурный фасад

Fig. 5. Examples of exterior panel finishes: a) ventilated facade, b) plastered facade

- Перегородки здания имеют внутреннюю обшивку с обеих сторон (например, дерево, гипсокартон, штукатурка), образующую готовую поверхность стены. Слои обшивки располагаются непосредственно на стене без монтажного зазора (рис. 6).

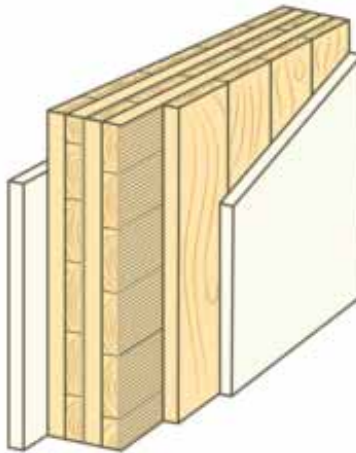


Рис. 6. Примеры отделки панелей перегородок

Fig. 6. Examples of partition panel finishes

Изучив основные конструктивные решения технологии *CLT*, рассмотрим ее достоинства и недостатки.

К преимуществам панелей CLT можно отнести:

- Высокую заводскую готовность домокомплекта за счет применения модулей.
- Скорость выполнения работ по монтажу домокомплекта.
- Высокую несущую способность и жесткость панелей за счет перекрестной склейки ламелей.
- Высокую сейсмоустойчивость зданий и сооружений из *CLT* панелей.
- Высокую огнестойкость конструкции.
- Низкую теплопроводность панелей.

К недостаткам панелей CLT можно отнести:

- Большой вес и габариты *CLT* панелей, требующие специального транспорта для перевозки и монтажа конструкций.
- Уменьшение габаритов панелей приводит к увеличению стыковых соединений, которые являются потенциальными «мостиками холода», а также усложняют монтаж конструкции.
- В связи с низкой стойкостью древесины к воздействию ультрафиолета и других природных факторов, которые могут ее разрушить, необходимо проводить дополнительные защитные мероприятия для сохранения целостности конструкции.

Основные достоинства и недостатки технологии *МНМ*.

К преимуществам МНМ можно отнести:

- Отсутствие усадки за счет использования пиломатериалов, обработанных в сушильных камерах до влажности 12–14 %.
- За счет перекрестного соединения ламелей обеспечивается высокая жесткость панелей.
- При производстве панелей используются только натуральные материалы.
- Скорость выполнения сборки домокомплекта за счет высокой готовности конструкций.
- Сразу после сборки здания можно приступить к отделке за счет гладких деревянных панелей.
- Панели *МНМ* имеют более низкую стоимость и меньший вес по сравнению с *CLT* за счет особенностей производства.

К недостаткам МНМ можно отнести:

- Недостаточность исследования данной технологии в России.
- Необходимость использования только калиброванных пиломатериалов.

Выводы

1. Несмотря на высокую схожесть процессов изготовления панелей *CLT* и *МНМ*, они имеют одно принципиально важное отличие: панели *CLT* создаются путем склеивания ламелей в прессах, а панели *МНМ* собираются с помощью алюминиевых гвоздей. Стоимость панелей *CLT* выше стоимости панелей *МНМ* на 30–40 %.

2. Применение технологии *CLT* оптимально для возведения многоэтажных зданий в случаях, когда несущая способность панелей и их высокая заводская готовность используется на 100 %, а высокая себестоимость производства компенсируется большим объемом возводимого строения.

3. В европейских странах многочисленно используют и технологии *МНМ* для строительства зданий.

4. Основным препятствием для массового использования *МНМ* панелей в России является нехватка проведённых испытаний таких конструкций с учетом массовости их

применения, и, как следствие, недостаток полноценной, современной документационной базы, а также отсутствие унификации и стандартизации таких конструкций.

5. Деревянное многоэтажное строительство из панелей *CLT* и *МНМ* – это реальность, поскольку оно соответствует современным нормам энергоэффективного строительства. Сооружения по данным технологиям могут возводиться на территориях со сложными инженерно-геологическими условиями, в сейсмически активных, горных или вечномерзлых районах.

6. Монтаж деревянных конструкций отличается высокой технологичностью и скоростью, ввиду того, что используются модули заводской сборки.

7. Технология строительства деревянных зданий *Massiv-Holz-Mauer* является более оптимальной по технико-экономическим, физическим и эксплуатационным характеристикам для России при условии серьезного изучения и проведения испытаний данной технологии.

Список литературы

1. Запруднов В.И., Серегин Н.Г., Потехин Н.И. Перспективы строительства уникальных зданий и сооружений из древесины // *Лесной вестник*. 2023. Т. 27. № 4. С. 128–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-128-136.
2. Запруднов В.И., Серегин Н.Г., Курдюков А.С. Большепролетные клееные деревянные конструкции и технология их изготовления // *Лесной вестник*. 2024. Т. 28. № 4. С. 138–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-138-146.
3. Серегин Н.Г. Укрепление грунтов при возведении грунтоцементных свай // *Промышленное и гражданское строительство*. 2023. № 4. С. 37–42. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.04.37-42.
4. Серегин Н.Г. Устройство цементогрунтовых свайных фундаментов с помощью механоактивации // *Промышленное и гражданское строительство*. 2025. № 5. С. 54–60. doi: 10.33622/0869-7019.2025.05.54-60
5. Власов С.А. Многоэтажное деревянное строительство: новые технологии и материалы. Москва: Стройиздат. 2020. 256 с.
6. Булатова И.В. Современные технологии производства клеёной древесины. Москва: Лесная промышленность. 2020. 224 с.
7. Бурмистров С.В. Инновационные технологии в производстве CLT панелей // *Строительные материалы*. 2020. № 4. С. 45–50.
8. Громадская Т.С. Клееный древесный материал: от истории до современности. Санкт-Петербург: Лесная школа, 2020.
9. Елисеев А. В. Технологические характеристики CLT панелей // *Современные материалы и технологии*. 2020. № 1. С. 77–81.
10. Сидоров Д.И. Применение панелей МНМ в жилом строительстве. Омск: ОГАСУ. 2021. 195 с.
11. Сидоров Д.Ю. Проблемы и перспективы использования CLT // *Научные исследования в строительстве*. 2022. № 4. С. 22–27.
12. Ковалев А.Н. Панели МНМ в современном строительстве: преимущества и недостатки. Казань: ТатГРЭИ. 2020. 160 с.
13. СП 515.1325800.2022 «Здания из клееного деревянного бруса. Правила проектирования и строительства». Дата введения 2022.05.09. Москва: «Стандартинформ». 2022. 42 с.
14. СП 452.1325800.2019 «Здания жилые многоквартирные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования». Дата введения 2020.04.29. Москва: «Стандартинформ». 2019. 53 с.
15. СП 451.1325800.2019 «Здания общественные с применением деревянных конструкций. Правила проектирования»: дата введения 2020.04.23. Москва: «Стандартинформ». 2019. 29 с.
16. СП 64.13330.2017 «Деревянные конструкции». Дата введения 27.02.2017 №129/пр. – Москва: «Стандартинформ». 2017. 102 с.
17. Промстройлес. Технические характеристики CLT плит [Электронный ресурс]. URL: <https://www.pslcomp.ru/clt-tehnologiya-stroitelstva-derevyannyh-domov/tehnicheskie-harakteristiki-clt-plit> (дата обращения: 18.09.2024)
18. SSA.RU / Инновационный материал для строительства загородных домов Gro Thermo [Электронный ресурс]. URL: <https://ssa.ru/news/innovacionnyi-material-dlja-stroitelstva-zagorodnyh-domov-gro-thermo.html> (дата обращения: 19.09.2024)

19. WOODFOCUS / Панели МХМ. История и особенности технологии [Электронный ресурс]. URL: https://woodfocus.ru/tehnology_5 Дата обращения: 22.09.2024.
20. WOOD MASSIV / Технология МММ [Электронный ресурс]. URL: <https://wm-mhm.ru/proizvodstvo/tehnologiya-mhm#cto-takoe-mhm-massiv-holz-mauer> Дата обращения: 23.09.2024
21. Massiv-Holz-Mauer® [Электронный ресурс]. URL: <https://www.massivholzmauer.de/de/produkte/massiv-holz-mauer-clt-/nlt> Дата обращения: 23.09.2024

References

1. Zaprudnov V.I., Seregin N.G., Potekhin N.I. Prospects for the Construction of Unique Buildings and Structures from Wood. *Lesnoy Vestnik*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 128–136. DOI: 10.18698/2542-1468-2023-4-128-136.
2. Zaprudnov V.I., Seregin N.G., Kurdyukov A.S. Large-span glued laminated timber structures and their manufacturing technology. *Lesnoy Vestnik*, 2024, vol. 28, no. 4, pp. 138–146. DOI: 10.18698/2542-1468-2024-4-138-146.
3. Seregin N.G. Soil Strengthening during the Construction of Soil-Cement Piles. *Industrial and Civil Engineering*, 2023, no. 4, pp. 37–42. DOI: 10.33622/0869-7019.2023.04.37-42.
4. Seregin N.G. Construction of Soil-Cement Pile Foundations Using Mechanical Activation. *Industrial and Civil Engineering*, 2025, no. 5, pp. 54–60. DOI: 10.33622/0869-7019.2025.05.54-60
5. Vlasov S.A. Multi-Story Wooden Construction: New Technologies and Materials. Moscow: Stroyizdat. 2020. 256 p.
6. Bulatova I.V. Modern Technologies for the Production of Glued Laminated Timber. Moscow: Lesnaya Promyshlennost. 2020. 224 p.
7. Burmistrov S.V. Innovative Technologies in the Production of CLT Panels. *Construction Materials*, 2020, no. 4, pp. 45–50.
8. Gromadskaya T.S. Glued Laminated Wood: From History to the Present. St. Petersburg: Lesnaya Shkola, 2020.
9. Eliseev A.V. Technological Characteristics of CLT Panels. *Modern Materials and Technologies*, 2020, no. 1, pp. 77–81.
10. Sidorov D.I. Application of MHM Panels in Residential Construction. Omsk: OGASU. 2021. 195 p.
11. Sidorov D.Yu. Problems and Prospects of Using CLT. *Scientific Research in Construction*, 2022, no. 4, pp. 22–27.
12. Kovalev A.N. MHM Panels in Modern Construction: Advantages and Disadvantages. Kazan: TatGREI. 2020. 160 p.
13. SP 515.1325800.2022 “Buildings Made of Glued Laminated Timber. Design and Construction Rules.” Effective date: 2022.05.09. Moscow: Standartinform. 2022. 42 p.
14. SP 452.1325800.2019 “Multi-Apartment Residential Buildings Using Wooden Structures. Design Rules.” Effective date: 2020.04.29. Moscow: Standartinform. 2019. 53 p.
15. SP 451.1325800.2019 “Public Buildings Using Wooden Structures. Design Rules”: effective date 23.04.2020. Moscow: “Standartinform”. 2019. 29 p.
16. SP 64.13330.2017 “Wooden Structures”. Effective date 27.02.2017 No. 129/pr. – Moscow: “Standartinform”. 2017. 102 p.
17. Promstroyles. Technical Characteristics of CLT Panels [Electronic resource]. URL: <https://www.pslcomp.ru/clt-tehnologiya-stroitelstva-derevyannyh-domov/tehnicheskie-harakteristiki-clt-plit> (Accessed: 18.09.2024)
18. SSA.RU / Innovative material for building country houses Gro Thermo [Electronic resource]. URL: <https://ssa.ru/news/innovacionnyi-material-dlja-stroitelstva-zagorodnyh-domov-gro-thermo.html> (Accessed: 19.09.2024)
19. WOODFOCUS / MHM panels. History and features of the technology [Electronic resource]. URL: https://woodfocus.ru/tehnology_5 Date of access: 22.09.2024.
20. WOOD MASSIV / MHM technology [Electronic resource]. URL: <https://wm-mhm.ru/proizvodstvo/tehnologiya-mhm#cto-takoe-mhm-massiv-holz-mauer> Date of access: 23.09.2024
21. Massiv-Holz-Mauer® [Electronic resource]. URL: <https://www.massivholzmauer.de/de/produkte/massiv-holz-mauer-clt-/nlt> Date of access: 23.09.2024

Информация об авторе /Information about the author

Николай Григорьевич Серегин, почетный работник сферы образования РФ, кандидат технических наук, доцент кафедры промышленного и гражданского строительства НИУ МГСУ. Москва e-mail: SereginNG@mgsu.ru
Nikolai Grigoryevich SEREGIN, Honored Worker of Education in the Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor at the Department of Industrial and Civil Engineering. Moscow e-mail: SereginNG@mgsu.ru

ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ СТРУКТУРНЫЕ ПОКРЫТИЯ БОЛЬШЕПРОЛЕТНЫХ ЗДАНИЙ

Б.С. СОКОЛОВ¹, канд. техн. наук

А. ИВАНОВ¹, д-р техн. наук

И.А. ЧЕРНЫЙ^{1,2}

В.А. ТИТАЕВ^{1,2}, канд. техн. наук

Д.В. ПАСХИН¹

¹Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнены исследования сборного большепролетного железобетонного структурного покрытия, собираемого из отдельных плоских рам.

Цель. Разработка основ нормативной базы проектирования железобетонных структурных покрытий.

Материалы и методы. Проведены расчетно-теоретические исследования конструктивных решений сборного большепролетного железобетонного структурного покрытия из плоских рам разных типоразмеров при различных схемах нагружения методом конечных элементов.

Результаты. На основании анализа результатов расчетно-теоретических исследований выполнена разработка рекомендаций по конструированию элементов и узлов, по армированию элементов. Разработаны предложения по нормированию параметров конструктивных элементов железобетонных структурных покрытий. Разработаны проектные предложения двух вариантов структурных покрытий.

Выводы. Разработанные рекомендации и проектные предложения направлены на повышение эффективности и расширение области применения конструктивных решений железобетонных большепролетных пространственных покрытий зданий.

Ключевые слова: сборные железобетонные конструкции, пространственные конструкции, структурные покрытия, двухпоясная решетка, стержневой элемент, конструирование, расчетная модель, метод конечных элементов

Для цитирования: Соколов Б.С., Иванов А., Черный И.А., Титаев В.А., Пасхин Д.В. Железобетонные структурные покрытия большепролетных зданий // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 59–75. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-59-75](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-59-75) EDN: JEJPCJ

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.04.2026

Поступила после рецензирования 14.05.2026

Принята к публикации 21.05.2026

REINFORCED CONCRETE SPACE FRAME ROOFS OF LARGE SPAN BUILDINGS

B.S. SOKOLOV¹, Cand. Sci. (Engineering)

A. IVANOV¹, Dr. Sci. (Engineering)

I.A. CHERNY^{1,2}

V.A. TITAEV^{1,2}, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. PASKHIN¹

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institut'skaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

² Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract

Introduction. Studies of a precast large-span reinforced concrete space frame roof assembled from separate flat frames have been carried out at the A.A. Gvozdev Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete.

The aim was to develop the fundamentals of the regulatory framework for the design of reinforced concrete space frame roofs.

Materials and methods. Computational and theoretical studies of the structural solutions of a precast large-span reinforced concrete space frame roof made of flat frames of different sizes for various loading schemes by finite element method have been carried out.

Results. Based on the analysis of the results of computational and theoretical studies, recommendations have been developed for the design of elements and assemblies, and reinforcement of elements. Proposals have been developed to normalize the parameters of the structural elements of reinforced concrete space frame roofs. Design proposals for two variants of space frame roofs have been developed.

Conclusions. The developed recommendations and design proposals are aimed at increasing efficiency and expanding the scope of structural solutions for reinforced concrete spatial roof systems of large-span buildings.

Keywords: precast reinforced concrete structures, spatial structures, space frame roofs, double-layer grid, bar member, design, calculation model, finite element method

For citation: Sokolov B.S., Ivanov A., Cherny I.A., Titaev V.A., Paskhin D.V. Reinforced concrete space frame roofs of large span buildings. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 59–75. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-59-75](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-59-75) EDN: JEJPCJ

Authors contribution statement

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

Funding

The study was carried out with the financial support of the Federal Center of Regulation, Standardization and Technical Assessment (FAU "FCC").

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.04.2026

Revised 14.05.2026

Accepted 21.05.2026

Введение

Одним из видов строительных конструкций, применяемых в покрытиях и перекрытиях зданий, являются системы регулярной структуры. К системам регулярной структуры относятся плиты регулярной структуры, работающие на изгиб, и пространственные регулярные системы, элементы которых работают преимущественно на сжатие и растяжение [1–3].

Конструкциями первого типа являются разнообразные конструктивные решения железобетонных часторебристых кессонных перекрытий, а также стальные листовые «вафельные» плиты. К конструкциям второго типа относятся пространственные стержневые, пластинчатые или пластинчато-стержневые системы. Стержневые элементы образуют регулярную двухпоясную решетку с ячейками в форме тетраэдров или октаэдров, что обеспечивает равную длину элементов и геометрическую неизменяемость системы. Узлы соединения являются наиболее ответственным и сложным элементом конструкции, объединяя стержневые элементы различного пространственного направления и различного знака продольных сил.

Структуры в пластинчатом или пластинчато-стержневом исполнении представляют собой регулярные складчатые конструкции, в которых все или отдельные плоскости формирующих тетраэдров или октаэдров выполнены пластинами, части которых, прилегающие к ребрам, работают как стержни [3, 4].

Наибольшее распространение как за рубежом [5–8], так и в нашей стране [9–11] приобрели стальные структурные конструкции. Такие конструкции, как правило, выполнены из тонкостенных трубчатых профилей. Наряду со стальными структурными конструкциями находят применение структуры из других материалов. Так, за рубежом достаточно популярны деревометаллические структурные конструкции, в которых несущие элементы выполнены из древесины со стальными узловыми соединениями.

Железобетонные и армоцементные структурные конструкции в сборном исполнении также находят свое применение как в зарубежной, так и в отечественной практике строительства [12–15].

К преимуществам структурных конструкций при разработке архитектурно-планировочных решений следует отнести возможность устройства плоской кровли, установки светоаэрационных конструкций, а также возможность устройства в межферменном пространстве (между верхним и нижним поясами двухпоясных конструкций) помещений и проходов, необходимых проемов, пропуска коммуникаций.

Конструктивными достоинствами сборных структурных конструкций является возможность унификации однотипных сборных элементов и индустриальность их изготовления.

1. Принципиальные конструктивные решения

В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева выполнен комплекс научно-исследовательских и проектно-конструкторских работ по разработке методов проектирования железобетонных структурных покрытий. В основу положено конструктивное решение железобетонного покрытия по а.с. № 945319, предложенное в лаборатории пространственных конструкций НИИЖБ (авторы д.т.н. проф. Г.К. Хайдуков, д.т.н. проф. В.В. Шугаев и др.) [16]. Конструктивное решение представлено на рис. 1 и 2.

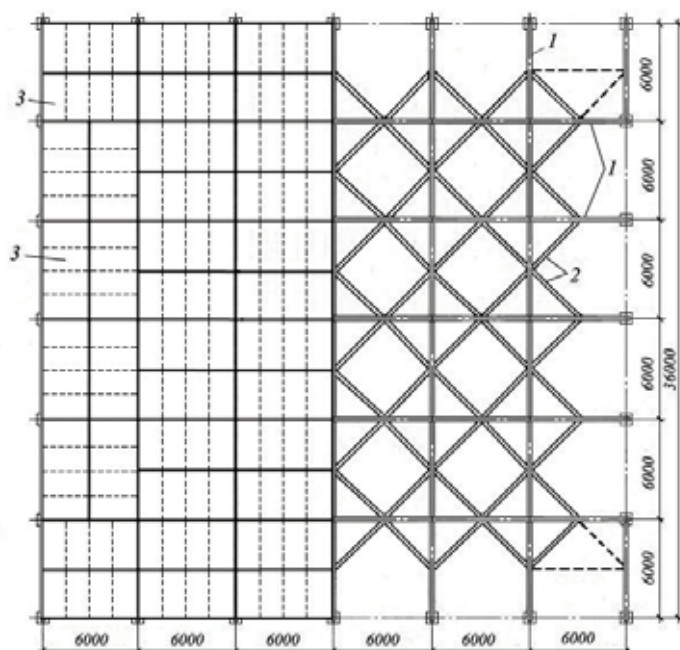


Рис. 1. План структурного покрытия размерами 36×36 м. 1 – треугольная рама; 2 – квадратная рама; 3 – плита настила. На правой половине плана плиты настила условно не показаны
Fig. 1. The plan of the space frame roof with size of 36×36 m. 1 – triangular frame; 2 – square frame; 3 – flooring plate. The floor slabs are conventionally not shown on the right half of the plan

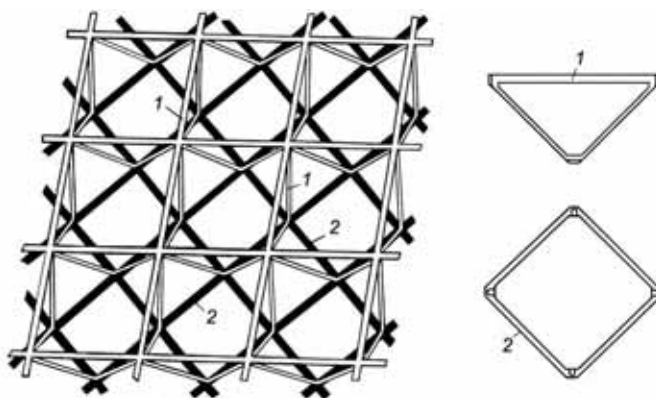


Рис. 2. Конструктивная схема структурного покрытия. 1 – треугольная рама; 2 – квадратная рама
Fig. 2. Structural scheme of the space frame roof. 1 – triangular frame; 2 – square frame

Объектом выполненного исследования является структурное покрытие, сохраняющее общее конструктивное решение по а.с. №№ 945319 [16, 17] с внесением в него некоторых конструктивных дополнений в части конструктивной реализации элементов и узловых соединений, обобщающих опыт выполненных исследований на маломасштабных моделях [18].

Структурное покрытие собирается из отдельных треугольных рам 1, обращенных вниз вершиной, расположенных вертикально, во взаимно перпендикулярных направлениях и соединенных между собой с образованием квадратных ячеек. Горизонтальные элементы

рам 1 вместе с уложенными и закрепленными на них плитами настила 3 образуют верхний пояс покрытия, а их наклонные линейные элементы – полуоктаэдрическую систему раскосов покрытия. К вершинам треугольных рам прикреплены своими углами квадратные рамы 2, расположенные горизонтально с образованием ячеек нижнего пояса. При этом квадратные ячейки верхнего и нижнего поясов несущих конструкций железобетонного покрытия повернуты относительно друг друга на угол 45° , что способствует увеличению пространственной жесткости покрытия, так как каждая квадратная рама нижнего пояса с четырьмя примыкающими к ее углам наклонными раскосами образует пирамиду, обладающую собственной высокой жесткостью на изгиб и кручение.

Пространственная решетка такой конфигурации по зарубежной классификации двухпоясных структур относится к типу SOD (Square-on-diagonal offset) или ISM (inclined square mesh grid), в которых оси элементов верхнего пояса параллельны сторонам внешнего контура покрытия, оси элементов нижнего пояса повернуты к ним на 45° , а узлы пересечения осей нижнего пояса располагаются в плане под серединами сторон верхнего пояса.

Под действием вертикальной нагрузки нижний пояс структурного покрытия работает на растяжение, в связи с чем линейные элементы квадратных рам рекомендуется выполнять преднапряженными с проволочной, прядевой или высокопрочной стержневой арматурой. Для крепления напрягаемой арматуры каждая рама 2 в углах снабжена внутренними анкерами, одновременно служащими для соединения между собой смежных квадратных рам.

Верхний пояс состоит из горизонтальных линейных элементов треугольных рам и прикрепленных к ним плит покрытия, которые включаются в пространственную работу конструкции, уменьшая свободную длину горизонтальных линейных элементов рам и разгружая их. Верхний пояс работает на сжатие с изгибом. В раскосах возникают знакопеременные продольные усилия. Треугольные рамные элементы целесообразно выполнять из высокопрочного бетона, что позволяет снизить расход бетона и вес конструкций.

Узловые соединения сборных элементов структурного покрытия выполняются сваркой закладных деталей. Наиболее напряженными являются сварные соединения сопряженных квадратных рам нижнего пояса.

Железобетонное покрытие отличается высокой степенью надежности. Отказ (выход из строя по какой-либо причине) отдельного элемента не приводит к обрушению конструкции, а лишь к перераспределению в ней усилий.

Структурные покрытия на пролет 24–36 м целесообразно выполнять строительной высотой не менее 3 м, в пределах которой может быть организован технический этаж с размещением оборудования и коммуникаций. Конфигурация вертикальных рам позволяет достаточно свободное размещение горизонтальных коммуникаций, в том числе трубопроводов и воздухопроводов большого сечения.

Монтаж структурного покрытия может выполняться как подъемом целиком с помощью кранов или домкратами по колоннам, так и с помощью укрупнения монтажных блоков размером на пролет или поэлементной сборкой на подмостях.

Преимуществом данной конструкции по сравнению с металлическими или деревянными структурными покрытиями является высокая огнестойкость и высокая коррозионная стойкость как железобетонной конструкции при условии выполнения защиты сварных узловых соединений монтажных элементов.

Структурная конструкция рассматриваемого вида может перекрывать как отдельно стоящие, так и многопролетные здания, с опиранием на колонны или сплошные несущие стены. В многопролетном здании с расположением колонн по контуру здания рационально покрытие опирать непосредственно на колонны, для чего линейный размер ячейки верхнего пояса следует принимать равным шагу колонн (рис. 3).

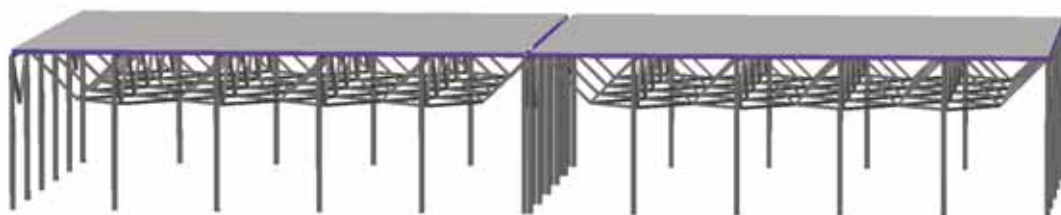


Рис. 3. Пример компоновки несущего каркаса здания размерами 30 x 60 м
Fig. 3. An example of the layout of the carrying framework of a building with size of 30 x 60 m

Для выполнения исследований структурных покрытий были приняты к рассмотрению следующие конструктивные ячейки здания:

- структурное покрытие размерами в плане 24×24 м высотой 3 м с опиранием на колонны по углам ячейки (рис. 4а);
- структурное покрытие размерами в плане 30×30 м высотой 3 м с опиранием на колонны по периметру ячейки с шагом 6 м (рис. 4б);
- структурное покрытие размерами в плане 36×36 м высотой 3 м с опиранием на колонны по периметру ячейки с шагом 6 м (рис. 4в).

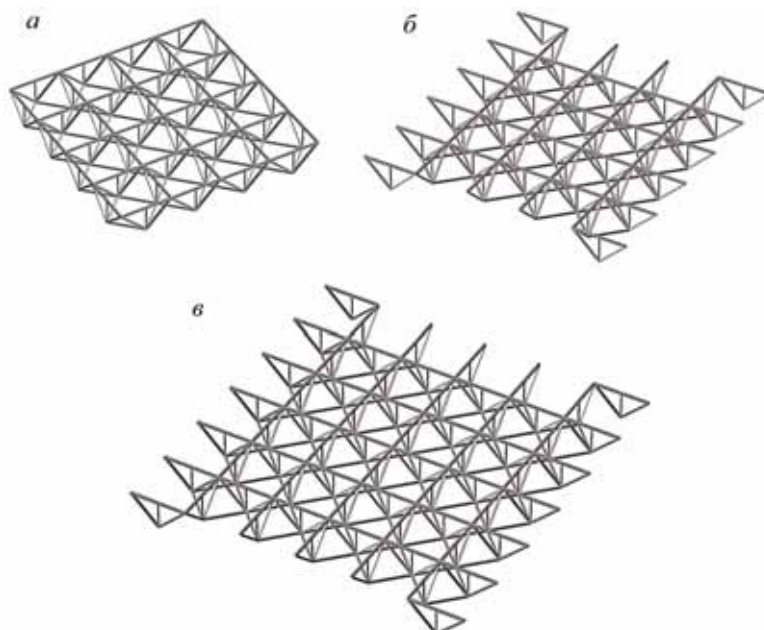


Рис. 4. Стержневые системы структурных покрытий: а – $24 \times 24 \times 3$ м с опиранием по углам;
б – $30 \times 30 \times 3$ м с опиранием по периметру; в – $36 \times 36 \times 3$ м с опиранием по периметру
Fig. 4. Bar systems of space frame roofs: а – $24 \times 24 \times 3$ m, resting on the corners;
б – $30 \times 30 \times 3$ m, resting on the perimeter; в – $36 \times 36 \times 3$ m, resting on the perimeter

Стержневые системы включают треугольные вертикальные сборные элементы крайних рядов ТК и треугольные элементы ТС средней части ячейки. Треугольные элементы в осях имеют одинаковые размеры (длина 6 м, высота 3 м), но различаются устройством опорных частей и высотой сечения наклонных стержней. Элементы нижнего пояса КК в осях имеют форму квадрата с диагональю 6 м и стороной 4,243 м (рис. 5).

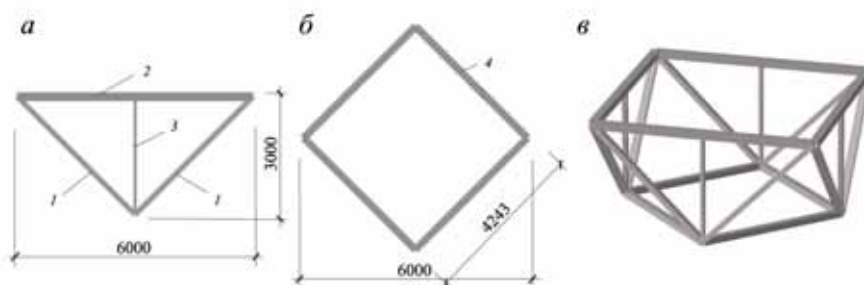


Рис. 5. Сборные элементы структуры: а – треугольный элемент ТК (ТС); б – элемент нижнего пояса КК; в – ячейка структуры из элементов ТК (ТС) и КК. 1 – раскос; 2 – ригель верхнего пояса; 3 – стойка; 4 – ригель нижнего пояса
Fig. 5. Precast units of space frame: а – triangular unit TK (TC); б – bottom chord unit CC; в – structural cell composed of TK (TC) and KK units. 1 – diagonal brace; 2 – top chord crossbar; 3 – post; 4 – bottom chord crossbar

2. Расчетные исследования

В рамках научно-исследовательской работы выполнены расчетные исследования по выбору расчетных моделей, а также по выбору рациональных геометрических параметров конструктивных элементов покрытия, прочностных и деформационных характеристик материалов. В ходе исследований путем выполнения многовариантных расчетов выявлялись области рациональных значений конструктивных параметров структур данного типа. Исследовано влияние на несущую способность и жесткость большепролетных железобетонных структурных покрытий следующих основных технических параметров:

- размеры плана перекрываемых помещений;
- соотношение сторон плана перекрываемого помещения;
- соотношение высоты покрытия с габаритными размерами конструктивной ячейки покрытия;
- формы и размеры поперечных сечений элементов сборных рамных конструкций.

На основе полученных результатов разработаны рекомендации по назначению технических параметров таких конструкций, а также методика расчета методом конечных элементов железобетонного структурного покрытия в эксплуатационной стадии работы по двум группам предельных состояний, включающая:

- назначение основных геометрических параметров конструктивных элементов на основе анализа функционального назначения и общих геометрических параметров здания;
- построение геометрии расчетных моделей методом конечных элементов;
- назначение прочностных и деформационных характеристик элементов структурной конструкции, в том числе плит покрытия и перекрытия;
- расчет жесткостных характеристик ребер плит покрытия и их эксцентриситетов к срединной поверхности полки для корректного учета совместной работы ребристых плит покрытия в составе верхнего пояса структурной конструкции;

- назначение граничных условий;
- назначение учитываемых нагрузок и воздействий и их расчетных комбинаций;
- расчет напряженно-деформированного состояния конструкции с учетом физической нелинейности материалов.

В расчетах полагалось шарнирно-неподвижное опирание структур на колонны. Расчетами установлено, что выбор рациональных размеров поперечных сечений стержневых элементов структуры определяется минимальными размерами по условиям прочности и устойчивости, а также конструктивными требованиями размещения продольной арматуры. Установлено также, что моделирование узловых соединений стержневых элементов структуры абсолютно жесткими при соблюдении центровки осей стержней в узлах не вызывает появления существенных изгибающих моментов в стержневых элементах. При допущении эксцентричного узлового сопряжения раскосов с поясами в расчетной модели следует учесть, что возникающие дополнительные моменты в отдельных случаях способны вызвать вблизи узла появление трещин, снижающих жесткость соединения раскоса с поясом.

В связи с возможным появлением указанных нежелательных эффектов возникает необходимость применения повышенных требований к точности сборки конструкции покрытия. Наряду с высоким качеством соблюдения проектной геометрии, повышенные требования следует предъявлять к качеству сварных соединений в узлах. В частности, проверке должны быть подвергнуты сварные швы 100 % узлов нижнего пояса.

Существенное влияние на расчетное напряженное состояние элементов верхнего пояса оказывает корректность учета эксцентричности положения полок и ребер плит покрытия относительно плоскости осей горизонтальных элементов треугольных рам, образующих верхний пояс.

С использованием разработанной методики на отдельных расчетных моделях численно исследовано напряженно-деформированное состояние четырех типоразмеров структурных большепролетных покрытий размерами в плане 24×24 , 30×30 , 30×36 и 36×36 м в различных вариантах опирания. В расчетно-теоретических исследованиях рассмотрены различные варианты нагружения равномерными и неравномерными поверхностными нагрузками, а также сосредоточенными узловыми нагрузками. Выполненными расчетами во всех рассмотренных вариантах структурных покрытий подтверждена высокая жесткость конструкции.

Картина напряженного состояния в стержневых элементах структуры при действии равномерно распределенной нагрузки на примере структурного покрытия размером 30×30 м представлена на рис. 6.

Напряженное состояние характеризуется наличием значительных продольных сил в стержневых элементах. Изгибающие моменты имеют место в элементах нижнего пояса, достигая в пролетах 5 кНм, а также в раскосах, достигая в треугольных рамах крайних рядов ± 2 кНм. В элементах верхнего пояса, работающих совместно с плитами покрытия, изгибающие моменты в вертикальной и горизонтальной плоскостях не превышают 5 кНм.

Нормальные напряжения в полках плит покрытия не превышают 3,5 МПа на сжатие, погонные изгибающие моменты не превышают 0,35 кНм/м.

Максимальный прогиб центральной части плана покрытия, рассчитанный с учетом коэффициента ползучести бетона $\varphi_{b,cr} = 1,4$, составил 36,9 мм или $1/813$ пролета.

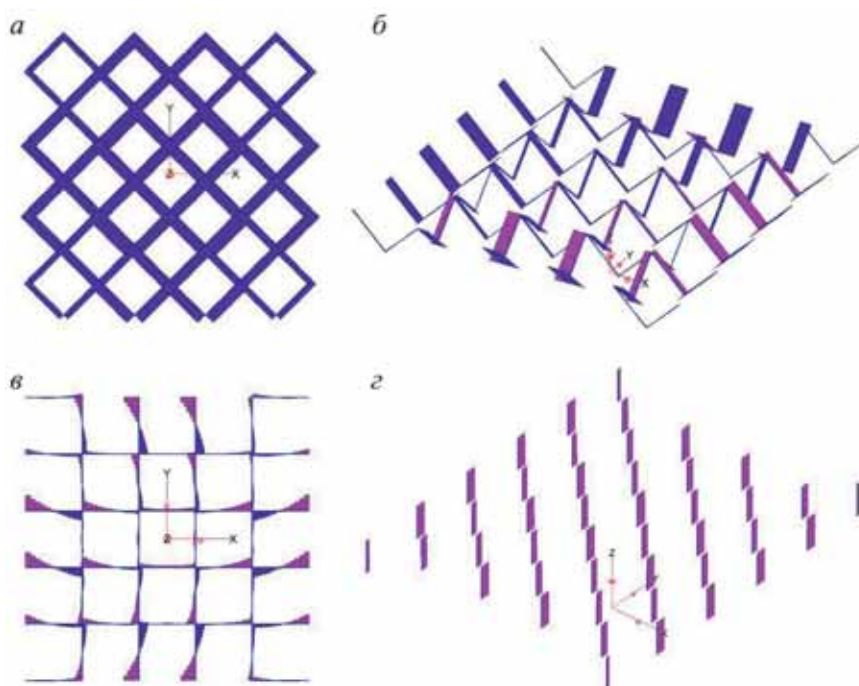


Рис. 6. Напряженное состояние в элементах структурного покрытия

- а – продольные силы в стержнях нижнего пояса, $N_{\max} = 561$ кН;
 б – продольные силы в раскосах, $N_{\max} = 478$ кН, $N_{\min} = -356$ кН;
 в – продольные силы в стержнях верхнего пояса, $N_{\max} = 182$ кН, $N_{\min} = -285$ кН;
 г – продольные силы в стойках, $N_{\min} = -67$ кН

Fig. 6. Stress state in the space frame roof elements.

- а – longitudinal forces in the bars of the bottom chord, $N_{\max} = 561$ кН;
 б – longitudinal forces in the braces, $N_{\max} = 478$ кН, $N_{\min} = -356$ кН;
 в – longitudinal forces in the top chord bars, $N_{\max} = 182$ кН, $N_{\min} = -285$ кН;
 г – longitudinal forces in the posts, $N_{\min} = -67$ кН

Выполнены расчеты общей устойчивости формы на разработанных расчетных моделях структурных покрытий. Подтверждена высокая общая устойчивость несущих систем покрытий рассмотренных типоразмеров: минимальный коэффициент устойчивости структуры размером 24×24 м составил 3,9; структуры размером 30×30 м – 4,1; структуры 36×36 м – 5,2.

Выполнена оценка влияния начальных несовершенств в виде нарушения прямолинейности оси наиболее нагруженных раскосов. Расчетами не выявлено существенного искажения картины напряженно-деформированного состояния покрытия относительно результатов расчета без учета начальных несовершенств.

Выполнены расчеты на устойчивость против прогрессирующего обрушения на разработанных расчетных моделях структурных покрытий. Рассмотрены наиболее опасные вероятные сценарии отказов несущих элементов покрытий – опорных раскосов и элементов нижнего пояса.

Выход из работы опорного подкоса вызвал локальное перераспределение усилий в смежных элементах решетки – соседнем раскосе и элементе нижнего пояса, соединяющем эти раскосы. Перераспределение усилий вызвало не критичный рост величины изгибающих моментов (до 7,4 кНм).

При выходе из работы элемента нижнего пояса из числа наиболее нагруженных при эксплуатации исправной конструкции перераспределение усилий носит более сложный характер. Во всех элементах нижнего пояса, расположенных на оси выбывшего из работы, усилия растяжения значительно снижаются. При этом несколько повышаются усилия на элементах нижнего пояса на смежных параллельных осях.

В целом ввиду высокой статической неопределимости структурной системы напряженное состояние элементов структуры при выходе отдельных элементов не изменяет своего характера, а дополнительные продольные усилия и изгибающие моменты в действующих элементах не настолько велики, чтобы привести к необходимости внесения конструктивных изменений в размеры сечений и армирование. Выполненные расчеты как в статической постановке для всех рассмотренных типоразмеров структур, так и в динамической постановке [19] подтверждают высокую устойчивость структурных конструкций к прогрессирующему обрушению.

Кроме расчетов квадратных в плане покрытий выполнен расчет структурного покрытия размерами 30×36 м для оценки работы элементов конструкции в различных направлениях при прямоугольной конфигурации плана покрытия. При данном соотношении размеров плана покрытия различие в напряженном состоянии элементов ортогональных направлений незначительно.

На основании анализа результатов расчетно-теоретических исследований выполнена разработка рекомендаций по конструированию элементов и узлов, по армированию элементов.

3. Проектные предложения

На основе результатов проведенных расчетных исследований выполнена разработка предложений по рациональным конструктивным решениям структурных покрытий.

Предложения разработаны для двух основных конструктивных решений – структурного покрытия с опиранием на колонны по контуру ячейки и структурного покрытия с опиранием на колонны по углам ячейки. В обоих случаях на плитах покрытия учитывались расчетная нагрузка веса кровли 0,38 кПа и равномерная снеговая нагрузка 2,1 кПа.

В качестве типичного представителя первого конструктивного решения выбрано для рассмотрения структурное покрытие размером 36×36 м (рис. 7).

Помимо указанных нагрузок на верхнем поясе, на элементах нижнего пояса учитывались расчетные нагрузки веса обслуживающих площадок и оборудования 1,64 кН/м и расчетная временная нагрузка 1,35 кН/м.

Второе конструктивное решение, отличающееся организацией эксплуатируемого межферменного этажа, рассмотрено на ячейке размером 24×24 м, максимальном размере, при котором расчетом в элементах установлены приемлемые значения внутренних усилий при заданной высоте конструкции 3 м (рис. 8).

Во всех случаях на верхнем поясе предусматривается использование железобетонных ребристых плит П-1 размером 3×6 м на основе типовой серии 1.465.1-21.94 с дополнением промежуточной закладной детали в середине продольных ребер для обеспечения совместности работы плит с верхним поясом структуры. Поскольку нагрузка с плит передается их продольными ребрами, схемы раскладки выбраны таким образом, чтобы нагружение элементов структуры в обоих направлениях различалось минимально.

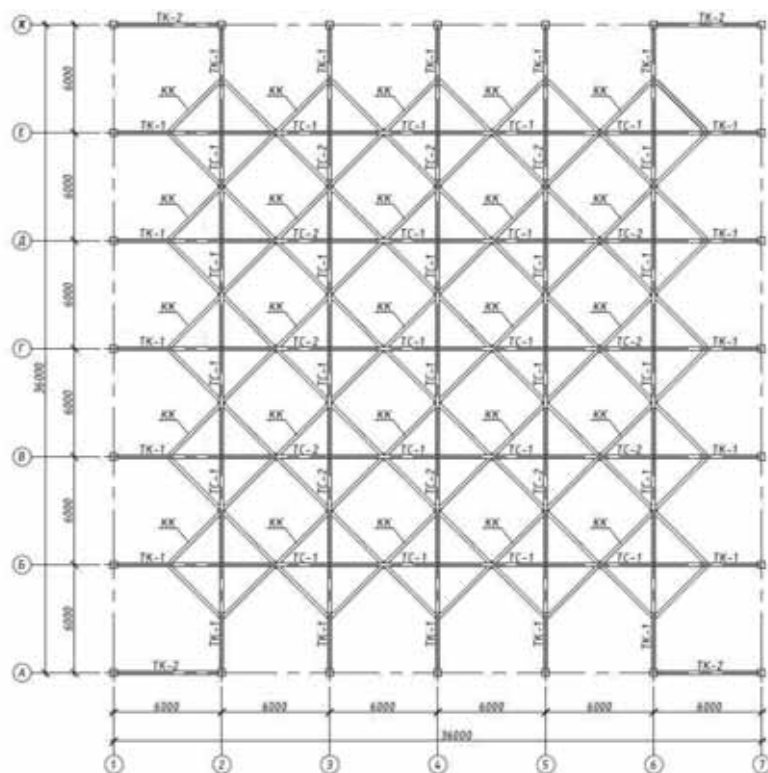


Рис. 7. Маркировочная схема каркаса структурного покрытия размером 36 × 36 м
Fig. 7. Marking scheme of the space frame with size of 36 × 36 m

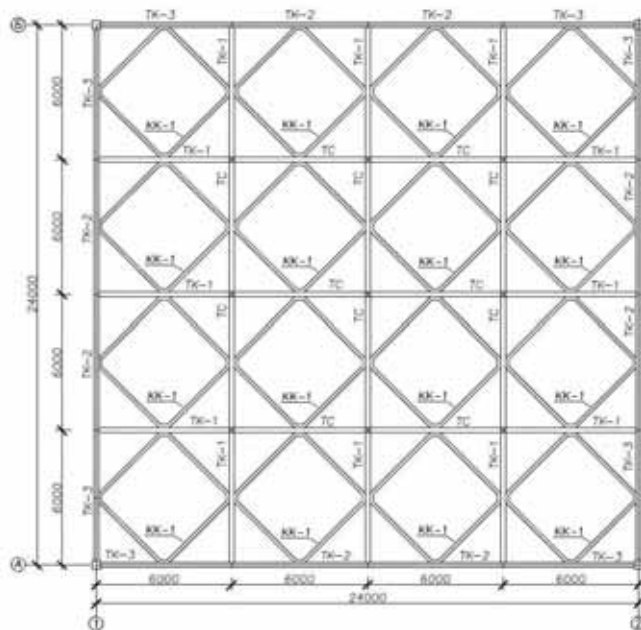


Рис. 8. Маркировочная схема каркаса структурного покрытия размером 24 × 24 м
Fig. 8. Marking scheme of the space frame with size of 24 × 24 m

В межферменном пространстве структуры на ячейку 24×24 м предусматривается устройство эксплуатируемых помещений. С этой целью по нижнему поясу структуры выполняется монолитная железобетонная плита толщиной 60 мм по стальному профилированному настилу Н75-750-0,8. При этом на плите нижнего пояса учитывалась расчетная нагрузка веса пола 0,65 кПа и расчетная временная нагрузка 2,4 кПа. Для опирания монолитной плиты по контуру ячейки 24×24 м между крайними узлами элементов нижнего пояса установлены стальные балки из швеллера 24 П.

Технические показатели разработанных вариантов структурных покрытий приведены в таблицах 1–8.

Конструктивная проработка показала, что применение железобетонного структурного покрытия взамен металлических структурных покрытий позволяет значительно снизить расход стали на покрытие при сопоставимой стоимости.

В процессе выполнения проектно-конструкторских проработок появились предложения по совершенствованию конструктивных решений структурных покрытий рассматриваемого типа путем соединения элементов нижнего пояса натяжением арматуры в построечных условиях с соответствующими техническими решениями выполнения элементов нижнего пояса и узлов их сопряжения [20].

Таблица 1

Геометрические параметры сечений и армирование элементов структурного покрытия размером 36×36 м с опиранием по контуру

Table 1

Geometric parameters of cross sections and reinforcement of space frame units of 36×36 m with contour support

Марка элемента	Сечение элемента, мм; продольное армирование элемента			
	Верхний пояс	Раскос	Стойка	Нижний пояс
ТС-1	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 140; 4Ø12A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТС-2	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 140; 4Ø16A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-1	220 × 160; 4Ø22A500C	220 × 160; 4Ø22A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-2	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 140; 4Ø10A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
КК	-	-	-	-

Таблица 2

Расход материалов на сборные элементы структур с опиранием по контуру

Table 2

Consumption of materials for precast units of space frames with contour support

Марка элемента	Масса элемента, т	Класс бетона	Расход бетона, м³	Расход стали, кг
ТС-1	1,25	B80, мелкозерн.	0,50	87,8
ТС-2	1,25	B80, мелкозерн.	0,50	114,0
ТК-1	1,31	B80, мелкозерн.	0,54	225,0
ТК-2	1,33	B80, мелкозерн.	0,53	86,3
КК	1,50	B40	0,60	303,6
П-1	2,68	B30	1,07	97,7

Таблица 3

**Приведенные показатели расхода материалов на сборные элементы структур
с опиранием по контуру**

Table 3

**The reduced indicators of material consumption for precast units
of structures with contour support**

Размеры покрытия, м	Количество сборных элементов марки, шт						Расход бетона*, см/м ²	Расход стали*, кг/м ²
	ТС-1	ТС-2	ТК-1	ТК-2	КК	П-1		
30 × 30	24	-	16	4	16	50	3,57/10,10	12,2/17,6
30 × 36	27	4	18	4	20	60	3,62/10,15	12,4/17,8
36 × 36	28	12	20	4	25	72	3,68/10,21	12,7/18,1

Примечание: * – в числителе – без плит покрытия, в знаменателе – с учетом плит покрытия

Таблица 4

**Геометрические параметры сечений и армирование элементов структурного покрытия
размером 24 × 24 м с опиранием по углам**

Table 4

**Geometric parameters of cross sections and reinforcement of space frame units
of 24 × 24 m with support at the corners**

Марка элемента	Сечение элемента, мм; продольное армирование элемента			
	Верхний пояс	Раскос	Стойка	Нижний пояс
ТС	220 × 140; 4Ø12A500C	220 × 140; 4Ø20A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-1	220 × 160; 4Ø14A500C	220 × 160; 6Ø20A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-2	220 × 160; 4Ø16A500C	220 × 160; 4Ø22A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
ТК-3	220 × 160; 4Ø12A500C	220 × 160; 8Ø22A500C	220 × 80; 4Ø8A500C	-
КК-1	-	-	-	140 × 250; 4Ø22A800C+ 4Ø12A500C

Таблица 5

Расход материалов на сборные элементы структуры с опиранием по углам

Table 5

Consumption of materials for precast units of space frames with support at the corners

Марка элемента	Масса элемента, т	Класс бетона	Расход бетона, м ³	Расход стали, кг
ТС	1,25	B80, мелкозерн.	0,50	88,0
ТК-1	1,43	B80, мелкозерн.	0,57	205,2
ТК-2	1,43	B80, мелкозерн.	0,57	185,8
ТК-3	1,60	B80, мелкозерн.	0,64	278,8
КК-1	1,53	B40	0,61	352,0
П-1	2,68	B30	1,07	97,7

Таблица 6

**Приведенные показатели расхода материалов на сборные элементы структуры с
опиранием по углам**

Table 6

**The reduced indicators of material consumption for precast elements of structures with
support at the corners**

Размеры покрытия, м	Количество сборных элементов марки, шт						Расход бетона*, см/м ²	Расход стали*, кг/м ²
	ТС	ТК-1-1	ТК-2-1	ТК-3	КК-1	П-1		
24 × 24	12	12	8	8	16	32	5,63/12,16	22,4/27,8

Примечание: * – в числителе – без плит покрытия, в знаменателе – с учетом плит покрытия

Таблица 7

**Приведенные показатели расхода материалов на структурное покрытие
с опиранием по контуру**

Table 7

**The reduced indicators of the consumption of materials for a space frame roof
with contour support**

Размеры покрытия, м	Расход бетона, см/м ²	Расход стали, кг/м ²
30 × 30	10,11	18,7
30 × 36	10,16	18,9
36 × 36	10,22	19,2
Примечания: 1. Расход бетона указан с учетом бетона замоноличивания швов между плитами П-1 2. Расход стали включает вес стальных соединительных деталей		

Таблица 8

Приведенные показатели расхода материалов на структурное покрытие с опиранием по углам

Table 8

**The reduced indicators of the consumption of materials for a space frame roof with support
at the corners**

Размеры покрытия, м	Расход бетона*, см/м ²	Расход стали*, кг/м ²
24 × 24	12,17/22,09	32,7/48,5
Примечания: 1. * – в числителе – без перекрытия по нижнему поясу, в знаменателе – с учетом межферменного перекрытия 2. Расход бетона указан с учетом бетона замоноличивания швов между плитами П-1 3. Расход стали включает вес стальных соединительных деталей и контурного элемента		

Выводы

Выполнены исследования конструктивного решения сборного железобетонного большепролетного покрытия, представляющего собой пространственную двухпоясную структуру из плоских треугольных и квадратных рам.

На трех расчетных моделях при различных схемах нагружения численно исследовано напряженно-деформированное состояние структурных покрытий размерами в плане 24 × 24, 30 × 30 и 36 × 36 м в различных вариантах опирания на колонны (для ячеек 30 × 30 м и 36 × 36 м по контуру конструктивной ячейки, для ячейки 24 × 24 м – по углам). Кроме того, выполнен расчет структурного покрытия размерами 30 × 36 м для оценки напряженного состояния элементов при разных длинах пролетов прямоугольного в плане покрытия.

Полученные результаты многовариантных расчетов позволили сформулировать рекомендации по расчету и конструированию структурных конструкций данного типа. Разработаны предложения по нормированию параметров несущих железобетонных конструкций структурных покрытий для внесения в нормативную документацию.

На основе результатов проведенных расчетных исследований выполнена разработка проектных предложений для двух основных конструктивных решений – структурного покрытия 36 × 36 м с опиранием на колонны по контуру ячейки и структурного покрытия 24 × 24 м с опиранием на колонны по углам ячейки.

Список литературы

1. Лубо Л.Н., МIRONKOV Б.А. Плиты регулярной пространственной структуры. Л., Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1976. 104 с.
2. Морозов А.П., Василенко О.В., МIRONKOV Б.А. Пространственные конструкции общественных зданий. Изд. 2-е. Л., Стройиздат, Ленингр. отд-ние, 1977. 168 с.
3. Каталог рекомендованных типов пространственных конструкций для общественных зданий с большими пролетами. Л., Стройиздат 1977. 160 с.
4. Клячин А.З. Исследование структурных конструкций из пирамид с фланцевыми узловыми сопряжениями // *Строительство и архитектура*. 1991. № 7. С.14 – 18.
5. Analyses, Design and Realization of Space Frames. A State-of-the-Art Report. IASS Working group WG08: Spatial Steel Structures. *Bulletin of the IASS*, no. 84/85, vol. XXV-1/2 April-August 1984, 114 p.
6. Makowski Z.S. Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids. CRC Press. 1990. 412 p.
7. Renton J.D. Elastic beams and frames. Camford Books. Parchment (Oxford) Ltd, 1999. 420 p.
8. Chilton J.C. Space grid structures. Architectural Press. Oxford, 2000. 179 p.
9. Трофимов В.И., Каминский А.М. Легкие металлические конструкции зданий и сооружений: разработка конструкций, исследования, расчет, изготовление, монтаж. М.: Наука, 1997. 592 с.
10. Хисамов Р.И. Расчет и конструирование структурных покрытий. К.: Будівельник, 1981. 48 с.
11. Рекомендации по проектированию структурных конструкций. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. М.: Стройиздат, 1983. 298 с.
12. А.с. 649803 СССР, МКЛ Е 04 В 7/14. Железобетонное покрытие / Г.И. Бердичевский, Н.Я. Сапожников, Л.В. Руф, Г.А. Гамбаров, А.К. Караковский, В.А. Филиппов. – Оpubл. 28.02.79, бюл. № 8.
13. Филиппов В.А., Садыков А.П. Прочность, трещиностойкость и деформативность узлов и стыков пространственного стержневого железобетонного покрытия блочного типа из предварительно напряженных рамных элементов: монография. Тольятти: Изд-во ТГУ, 2011. 235 с.
14. Филиппов В.А. Пространственное стержневое покрытие блочного типа из предварительно напряженных рамных элементов / Г.И. Бердичевский, Л.В. Руф, В.А. Филиппов // *Расчет и конструирование железобетонных конструкций: Труды НИИЖБ*, 1977. Вып. 39. С. 106–115.
15. Chilton John. Nuovi edifici espositivi. / Chilton J., Prandoni F., Atlante delle Strutture reticolari. *Grande Atlante di Architettura. Unione Tipografico-Editrice Torinese UTET*. Torino, 2002, pp. 183–187.
16. А.с. №945319 СССР МКЛ. Е 04 В 7/14 Железобетонное покрытие. / В. В. Шугаев, Г.К. Хайдуков, Э.А. Агаев, В.Н. Ушаков. 1982, Бюл. № 27.
17. Шугаев В.В., Агаев Э.А. Железобетонное структурное покрытие здания для строительства в сейсмическом районе. / *Строительство в особых условиях. Сейсмостойкое строительство*. Н.-т. реферативный сб. Серия 14, вып. 8, отчет. ВНИИС Госстроя СССР, М., 1981.
18. Shugaev V. Experimental investigation and limit analysis of the reinforced concrete spatial roof. Invited Lecture at the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, September, 1986 / *Bulletin of the IASS*, no. 91, vol. XXVII-2, August 1986, pp. 11–17.
19. Черный И.А., Соколов Б.С., Титаев В.А. Исследование структурного железобетонного покрытия на устойчивость к прогрессирующему разрушению. *Будущее строительной отрасли: вызовы и перспективы развития: сборник трудов Третьего Международного научно-практического симпозиума (г. Москва, 15–19 сентября 2025 г.)* / ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ». Москва: Издательство МИСИ – МГСУ, 2025. Текст: электронный. С. 137–142.
20. Патент на изобретение RU 2851903 С1. Е04В 7/14; Е04В 1/22. Преднапряженная железобетонная пространственная стержневая конструкция. Черный И.А., Соколов Б.С., Титаев В.А. Оpubл. 01.12.2025, бюл. № 34.

References

1. Lubo L.N., Mironkov B.A. Plates of regular spatial structure. L., Stroyizdat, Leningrad Publishing House, 1976, 104 p. (In Russian).
2. Morozov A.P., Vasilenko O.V., Mironkov B.A. Spatial structures of public buildings. Ed. 2. L., Stroyizdat, Leningrad Publishing House, 1977, 168 p. (In Russian).
3. Catalog of recommended types of spatial structures for public buildings with large spans. L., Stroyizdat 1977, 160 p. (In Russian).

4. Klyachin A.Z. Investigation of structural structures from pyramids with flanged nodal joints. *Construction and architecture*, 1991, no. 7, pp. 14–18 (In Russian).
5. Analyses, Design and Realization of Space Frames. A State-of-the-Art Report. IASS Working group WG08: Spatial Steel Structures. Bulletin of the IASS, no. 84/85, vol. XXV-1/2 April–August 1984, 114 p.
6. Makowski Z.S. Analysis, Design and Construction of Double-Layer Grids. CRC Press. 1990. 412 p.
7. Renton J.D. Elastic beams and frames. Camford Books. Parchment (Oxford) Ltd, 1999, 420 p.
9. Trofimov V.I., Kaminsky A.M. Light metal structures of buildings and structures: design development, research, analysis, manufacture, installation. Moscow: Nauka, 1997, 592 p. (In Russian).
10. Khisamov R.I. Analysis and construction of space frame roofs. K.: Budivelnik, 1981, 48 p. (In Russian).
11. Recommendations for the design of space frame structures. V.A. Koucherenko Central Research Institute. Moscow: Stroyizdat, 1983, 298 p. (In Russian).
12. Patent 649803 USSR, MKI E 04 In 7/14. Reinforced concrete roof / G.I. Berdichevsky, N.Ya. Sapozhnikov, L.V. Ruf, G.A. Gambarov, A.K. Karakovsky, V.A. Filippov. – Publ. 02/28/179, issue No. 8.
13. Filippov V.A., Sadykov A.P. Strength, crack resistance and deformability of nodes and joints of block-type spatial beam reinforced concrete roof made of prestressed frame elements: monograph. Tolyatti: TSU Publishing House, 2011. 235 p. (In Russian).
14. Filippov V.A. Spatial beam roof of a block-type of prestressed frame elements / G.I. Berdichevsky, L.V. Ruf, V.A. Filippov. *Calculation and construction of reinforced concrete structures: Proceedings of the National Research Institute for Concrete and Reinforced Concrete*, 1977. Issue 39. pp. 106–115 (In Russian).
15. Chilton John. Nuovi edifici espositivi. / Chilton J., Prandoni F., Atlante delle Strutture reticolari. *Grande Atlante di Architettura. Unione Tipografico-Editrice Torinese UTET*. Torino, 2002, pp. 183–187.
16. Patent No. 945319 USSR MKL. E 04 In 7/14 Reinforced concrete coating. / V. V. Shugaev, G.K. Khaidukov, E.A. Agaev, V.N. Ushakov. 1982, Bul. no. 27.
17. Shugaev V.V., Agaev E.A. Reinforced concrete space frame roof of buildings for construction in a seismic area. *Construction in special conditions. Earthquake-resistant construction. N.-T. Abstract collection*, Series 14, issue 8, ed. VNIIS Gosstroy of the USSR, Moscow, 1981. (In Russian).
18. Shugaev V. Experimental investigation and limit analysis of the reinforced concrete spatial roof. Invited Lecture at the IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, Osaka, September, 1986 / Bulletin of the IASS, no. 91, vol. XXVII-2, August 1986, pp. 11–17.
19. Cherny I.A., Sokolov B.S., Titaev V.A. Investigation of reinforced concrete space frame roof for resistance to progressive collapse / *The future of the construction industry: challenges and development prospects: proceedings of the Third International Scientific and Practical Symposium (Moscow, September 15–19, 2025) / Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education “NRU MGSU”*. Moscow: MISI – MGSU Publishing House, 2025. Text: electronic. pp. 137–142 (In Russian).
20. Patent for invention RU 2851903 C1. E04B 7/14; E04B 1/22. Prestressed reinforced concrete spatial beam structure. Cherny I.A., Sokolov B.S., Titaev V.A. Publ. 12/01/2025, bull. No. 34.

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Сергеевич Соколов*, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Boris S. Sokolov, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

Акрам Иванов, доктор техн. наук, главный научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных наук НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Akram Ivanov, Dr. Sci. (Engineering), Chief researcher of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

Иван Александрович Черный, аспирант, младший научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; преподаватель кафедры строительной и теоретической механики Института промышленного и гражданского строительства НИУ МГСУ, Москва.

Ivan A. Cherny, Graduate student, Junior Researcher of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Lecturer, Department of Structural and Theoretical Mechanics of the Institute of Industrial and Civil Engineering of the National Research Moscow State University of Civil Engineering (NRU MGSU), Moscow.
e-mail: kron_975@mail.ru

Виталий Александрович Титаев, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, Москва.

Vitaly A. Titaev, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of the Thin-Walled and Spatial Structures, NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, NRU MGSU, Moscow.
e-mail: titaev@bk.ru

Дмитрий Владимирович Пасхин, заместитель заведующего лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitry V. Pashin, Deputy Head of the Laboratory for thin-walled and spatial structures of NIIZhB named after A.A. Gvozdev JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: moo-shell@mail.ru

*Автор, ответственный за переписку/Corresponding author

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ПОЖАРНОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ С УЧЕТОМ ВРЕМЕННОЙ ПОЖАРНОЙ НАГРУЗКИ

Д.И. ПУЦЕВ¹, д-р техн. наук

Р.В. ЮРЬЕВ², канд. техн. наук

Ю.М. ГРОШЕВ^{3*}, канд. техн. наук

¹ ООО «Научно-технический центр «Промышленная и пожарная безопасность» (ООО «НТЦ ППБ»), ул. Свердлова, д.65, офис 5, Московская обл., г. Балашиха, Российская Федерация

² АО «Атомэнергопроект», Бакунинская ул., д.7, стр.1, г. Москва, 107996, Российская Федерация

³ Независимый исследователь. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В статье описано применение полевого моделирования пожара для обоснования мероприятий по обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений с учетом временной пожарной нагрузки.

Цель. Разработка мероприятий по защите систем безопасности при пожаре в помещениях АЭС с применением полевого моделирования пожара, что очень важно для обоснования достаточности уровня противопожарной защиты АЭС.

Материалы и методы. Проведен анализ назначения и области применения различных методов моделирования динамики развития и распространения ОФП (опасных факторов пожара). Рассмотрено применение полевого метода для моделирования пожара в зданиях и сооружениях с учетом временной пожарной нагрузки. Представленный в статье аналитический материал подтвержден примерами результатов моделирования пожара в таких помещениях АЭС.

Результаты. На основании проведенного анализа различных методов моделирования динамики развития и распространения опасных факторов пожара показана возможность использования различных методов моделирования пожара при анализе пожарной безопасности зданий и сооружений с учетом временной пожарной нагрузки. Предлагается учитывать в мероприятиях по обеспечению безопасности АЭС от воздействия опасных факторов пожара меры, направленные на снижение вероятности возникновения пожара.

Выводы. Использование полевого метода позволяет рассчитать температуру, скорость, концентрации компонентов смеси в каждой точке расчетной области, а также применить полевой метод для определения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкции зданий и сооружений, в том числе с учетом временной пожарной нагрузки.

Ключевые слова: полевой метод моделирования пожара, опасные факторы пожара, комплекс программного обеспечения, временная пожарная нагрузка, вероятность отказа строительных конструкций

Для цитирования: Пуцев Д.И., Юрьев Р.В., Грошев Ю.М. Использование полевого моделирования пожара для обоснования мероприятий по обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений с учетом временной пожарной нагрузки // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 76–86. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-76-86](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-76-86) EDN: KSHYNN

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнялось за счет средств ООО «НТЦ ППБ».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 29.04.2026

Поступила после рецензирования 20.05.2026

Принята к публикации 05.06.2026

USING FIELD FIRE MODELING TO JUSTIFY MEASURES FOR ENSURING FIRE SAFETY OF BUILDINGS AND STRUCTURES CONSIDERING TEMPORARY FIRE LOADS

D.I. PUTSEV, Dr. Sci. (Engineering)

R.V. YURYEY, Cand. Sci. (Engineering)

YU.M. GROSHEV*, Cand. Sci. (Engineering)

¹ Scientific and Technical Center "Industrial and Fire Safety" LLC (NTC PPB LLC), 65 Sverdlova St., Office 5, Balashikha, Moscow Region, Russian Federation

² Atomenergoproekt JSC, 7 Bakuninskaya St., Bldg. 1, Moscow, 107996, Russian Federation

³ Independent Researcher. Moscow, Russian Federation

Abstract

Introduction. This article describes the use of field modeling of fire to justify measures to ensure fire safety of buildings and structures, taking into account the temporary fire load.

Aim. Development of measures to protect safety systems in case of fire in NPP premises using field fire modeling, which is very important for substantiation of sufficiency of NPP fire protection level.

Materials and methods. Based on the analysis of various methods of modeling the dynamics of the development and spread of fire hazards, the possibility of using various methods of modeling fire in the analysis of fire safety of buildings and structures, taking into account the temporary fire load, was shown.

It is proposed to take into account in measures to ensure the safety of nuclear power plants from the effects of fire hazards measures aimed at reducing the likelihood of fire.

Results. An analysis of the purpose and scope of various methods for modeling the dynamics of the development and spread of relative permeability (fire hazards) was carried out. The application of the field method for modeling fire in buildings and structures taking into account the temporary fire load is considered. The analytical material presented in the article is confirmed by examples of fire simulation results in such NPP premises.

Conclusions. Using the field method allows you to calculate the temperature, speed, concentrations of mixture components at each point in the design area, as well as apply the field method to determine the requirements for fire resistance of load-bearing and enclosing structures of buildings and structures, including taking into account the temporary fire load.

Keywords: field fire simulation method, fire hazards, software package, temporary fire load, probability of failure of building structures

For citation: Putsev D.I., Yuryev R.V., Groshev Yu.M. Using field fire modeling to justify measures for ensuring fire safety of buildings and structures considering temporary fire loads. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 76–86. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-76-86](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-76-86) EDN: KSHYHH

Authors contribution statement

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

Funding

The study was carried out with the financial support of NTC PPB.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 29.04.2026

Revised 20.05.2026

Accepted 05.06.2026

Статья является продолжением тематики по публикациям на тему применения полевого моделирования пожара для выполнения расчетов и обоснований мероприятий по обеспечению пожарной безопасности [1–3].

В данной статье предложено использовать полевое моделирование пожара для обоснования мероприятий по обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений с учетом временной пожарной нагрузки. Применение полевого моделирования для возможности учета при разработке мероприятий по наличию временных пожарных нагрузок. Эта проблема особенно актуальна при проведении анализа пожарной безопасности с учетом значительной привнесенной пожарной нагрузки.

Для описания термогазодинамических параметров пожара применяются три основных группы детерминистических моделей: интегральные, зонные (зональные) и полевые.

Выбор конкретной модели расчета времени блокирования путей эвакуации следует осуществлять исходя из следующих предпосылок:

а) интегральный метод:

– для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;

– для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);

– для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара.

б) зонный (зональный) метод:

– для помещений и систем помещений простой геометрической конфигурации, линейные размеры которых соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз).

В отличие от интегральных моделей зональный метод может использоваться:

– для помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;

– для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т.д.).

в) полевой метод:

– для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т.д.);

– для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т.д.);

– для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т.д.

Для определения фактических пределов огнестойкости строительных конструкций использовалась математическая модель расчета прогрева строительных конструкций.

Плотность теплового потока на внешней (огневой) границе стенки определяется из решения моделей пожара или по формулам расчета лучистого теплового потока.

За наступление предела огнестойкости строительной конструкции перехода принимается момент времени от начала пожара, когда температура хотя бы в одном месте конструкции достигает критического значения.

В тех случаях, когда требовалось рассчитать локальные параметры развития пожара или область применения не позволяла использовать эмпирические или средне-объемные модели, для расчета динамики пожара применялась созданная во ВНИИПО полевая модель. Это относится, прежде всего, к расчетам пожара в больших помещениях, помещениях с неравномерно распределенной пожарной нагрузкой и сложным режимом газообмена, к задаче определения безопасных расстояний для оборудования систем безопасности. Данная модель создана с учетом требований и рекомендаций по применению методов полевого моделирования и предусматривает решение системы уравнений газодинамики и теплообмена с учетом моделирования процессов горения и переноса тепла излучением.

Другими примерами использования эмпирических методик оценки динамики пожара являются методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения и метод расчета требуемого предела огнестойкости, изложенные в [4]. Указанные методы расширяют подход, описанный выше, с целью получить более точные количественные требования к пределам огнестойкости строительных конструкций с учетом фактических характеристик пожарной нагрузки и воздухообмена помещения с окружающей средой. Методы разработаны ВНИИПО на основе результатов обобщения экспериментальных данных по пожарам в жилых помещениях. Поскольку областью определения данных методов являются помещения, имеющие воздухообмен с окружающей средой при степени проемности (рассчитанной по отношению площади проемов к площади пола) в пределах 3–33 %, их применение для расчетов пожаров в помещениях пожарных зон АЭС, имеющих значительные ограничения по связи с окружающей средой, лежит за пределами области определения.

Пожарная нагрузка помещения/здания разделяется на постоянную (элементы строительных конструкций, состоящие из горючих материалов) и временную (горючие и воспламеняющиеся предметы, обращающиеся в помещениях включая мебель, технологическое и санитарно-техническое оборудование, расходные материалы и т. п.) [5].

Наиболее характерным примером является ответ на вопрос, как изменится характер пожара при въезде автомобиля на склад. Для атомной энергетики это особенно актуально при проведении анализа оценки последствий пожара в случае загорания автомобиля, перевозящего радиоактивные отходы при их погрузке/разгрузке в помещении транспортного въезда, например, в хранилище свежего топлива и твердых радиоактивных отходов АЭС.

Покажем применение полевого моделирования для оценки последствий пожара в случае загорания автомобиля в транспортном въезде хранилища.

Представлена оценка последствий пожара в случае загорания автомобиля, перевозящего радиоактивные отходы при их погрузке/разгрузке в помещении транспортного въезда.

Автомобиль грузоподъемностью 16 тонн; базовое шасси МАЗ; вместимость топливного бака 300 л; колесная формула 8×4 . Основная пожарная нагрузка топливо, резина, смазочные материалы.

При расчете принимается выгорание 30 кг (чуть более 10 % процентов от их общего количества – 250 кг и 18 кг) топлива и смазочных материалов автомобиля.

В расчете предполагается непрерывный пролив и горение топлива и смазочного масла автомобиля в районе двигателя.

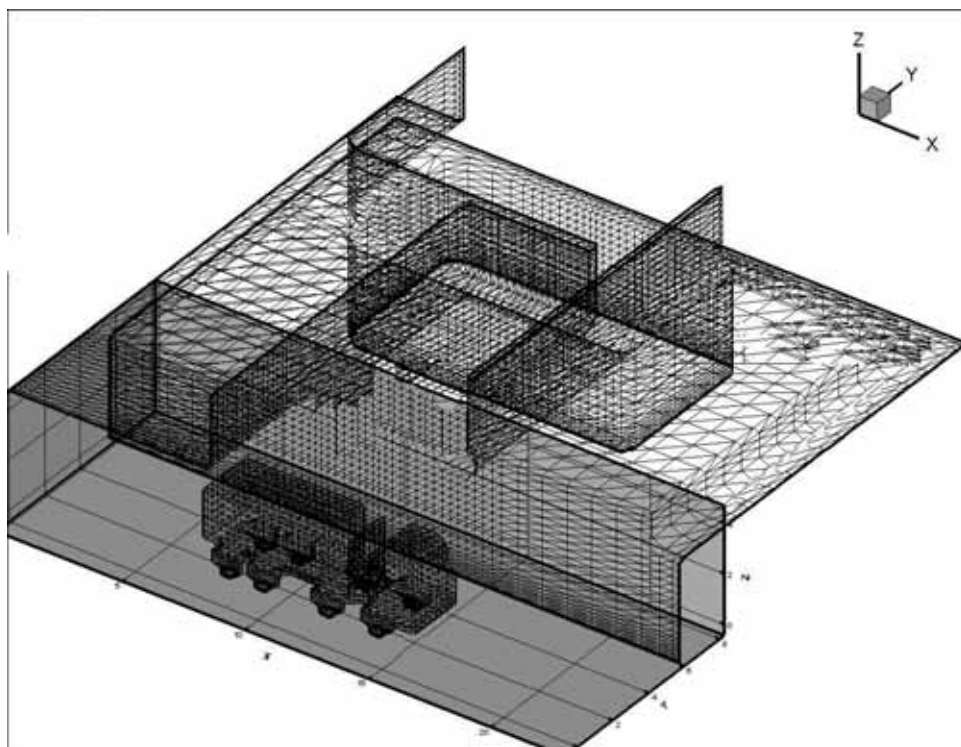


Рис. 1. Аксонометрия расчетной схемы
Fig. 1. Axonometry of the design diagram

Площадь горения принята около 4 м^2 . При сценарии с пролонгированным проливом топлива и смазочное масло обеспечивают роль высокоэнергетического источника горения и разжигания всех колес автомобиля. При этом колеса создают более высокий уровень пожарной нагрузки, чем само топливо. Начало распространения ОФП при одновременном загорании пролива и передних колес представлено на рис. 2.

Предполагается, что ворота были открыты при проведении неудачных попыток тушения автомобиля и оставлены в таком состоянии из-за высокого уровня ОФП в районе ворот при развитии пожара.

Результаты расчетов представлены ниже.

На рис. 2–5 представлена динамика распространения поля абсолютной температуры K через различное время от начала горения всей площади пролива и колес на передней оси.

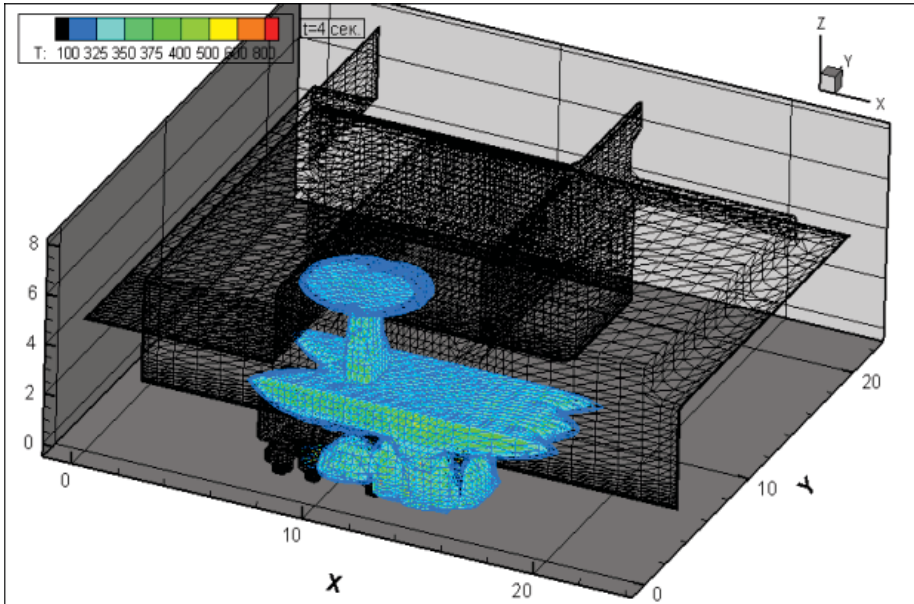


Рис. 2. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 4 сек
Fig. 2. Dynamics of K absolute temperature field propagation in 4 sec

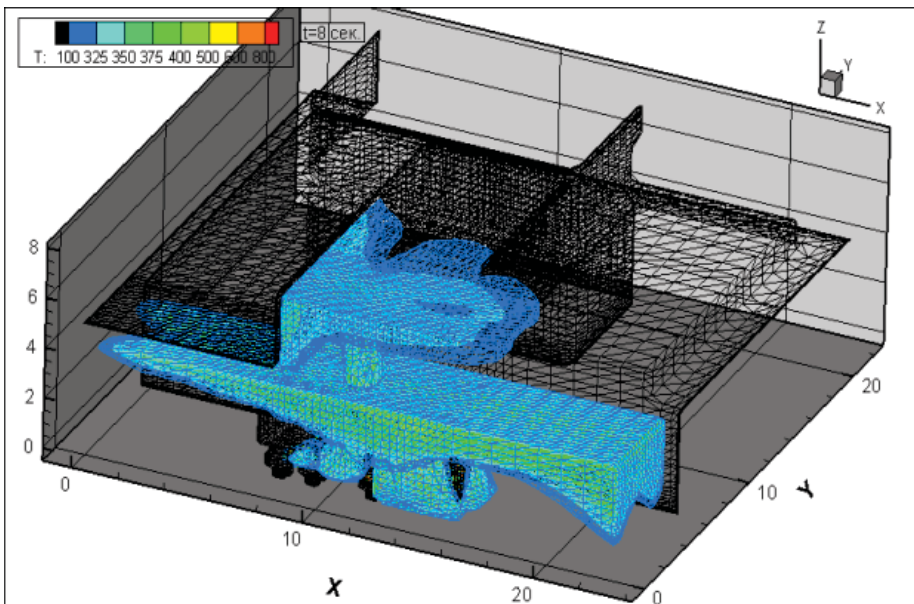


Рис. 3. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 8 сек
Fig. 3. Dynamics of K absolute temperature field propagation in 8 sec

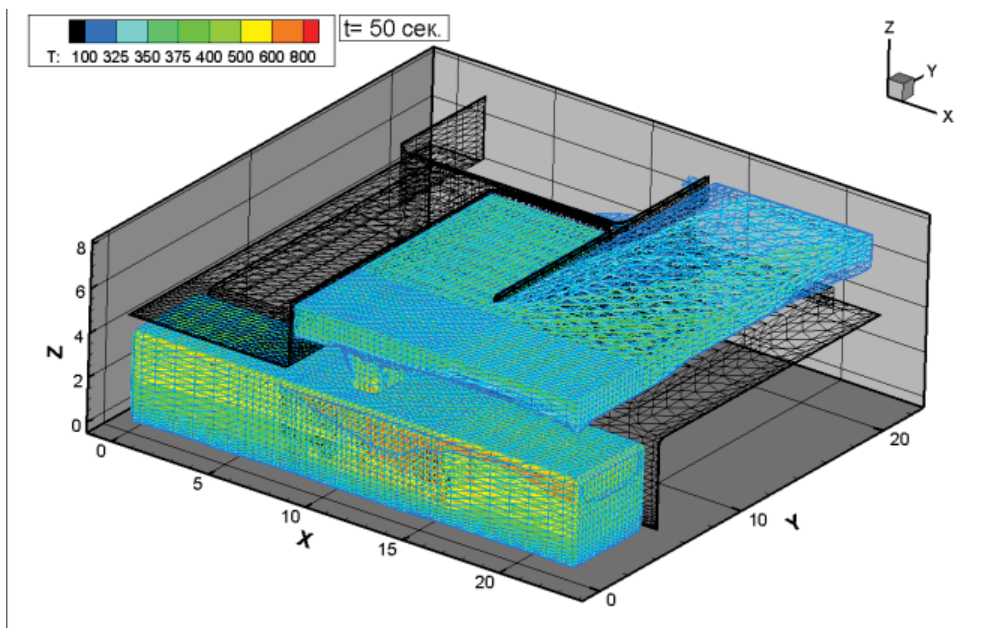


Рис. 4. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 50 сек
Fig. 4. Dynamics of absolute temperature K field propagation in 50 sec

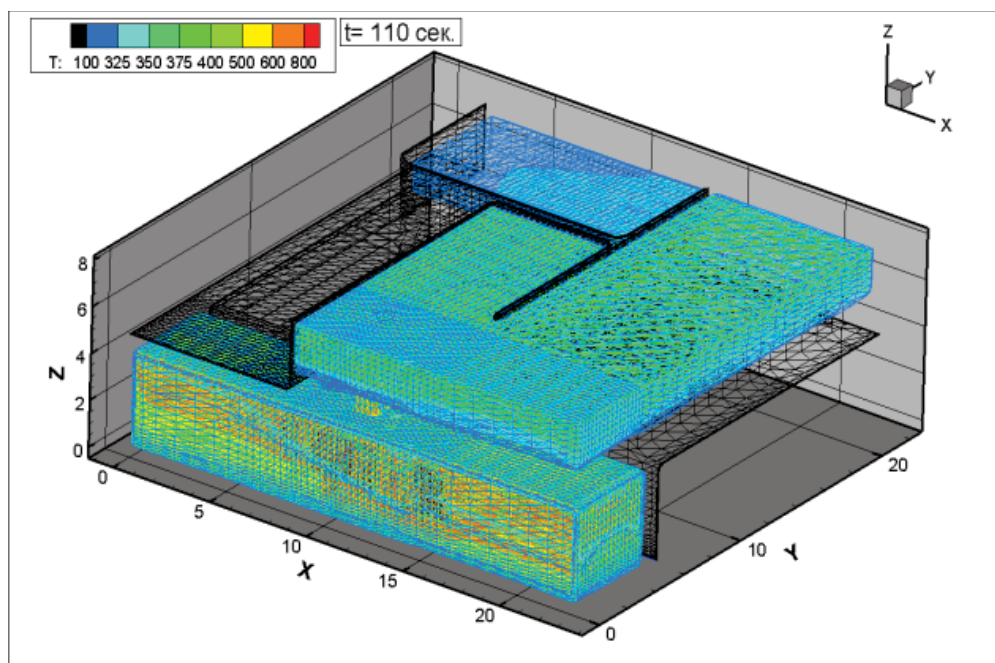


Рис. 5. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 110 сек
Fig. 5. Dynamics of absolute temperature K field propagation in 110 sec

Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания, K , через 4, 8, 58, 118 сек после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси показана на рис. 6–9.

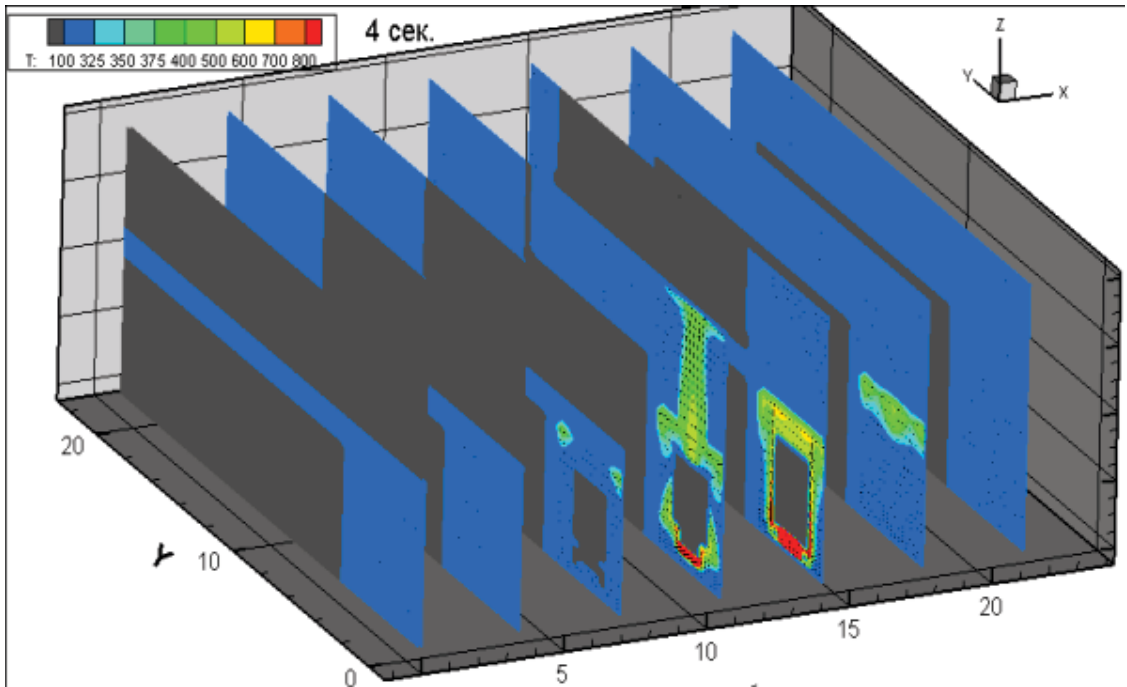


Рис. 6. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 4 сек

Fig. 6. Dynamics of K absolute temperature field propagation in 4 sec

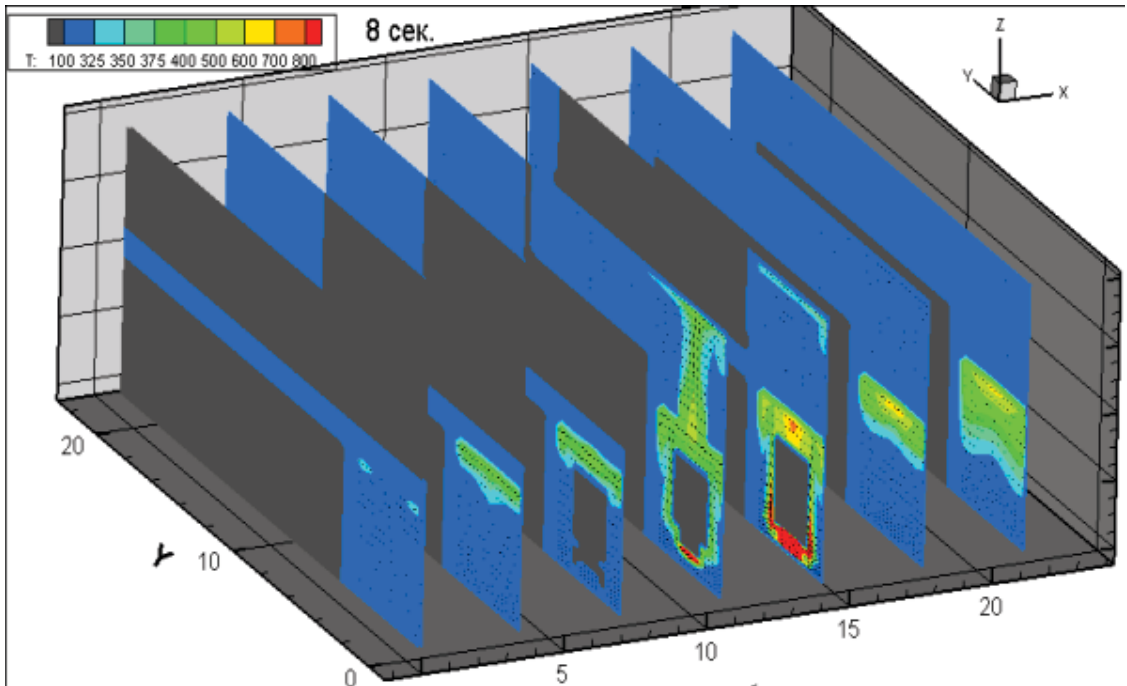


Рис. 7. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 8 сек

Fig. 7. Dynamics of K absolute temperature field propagation in 8 sec

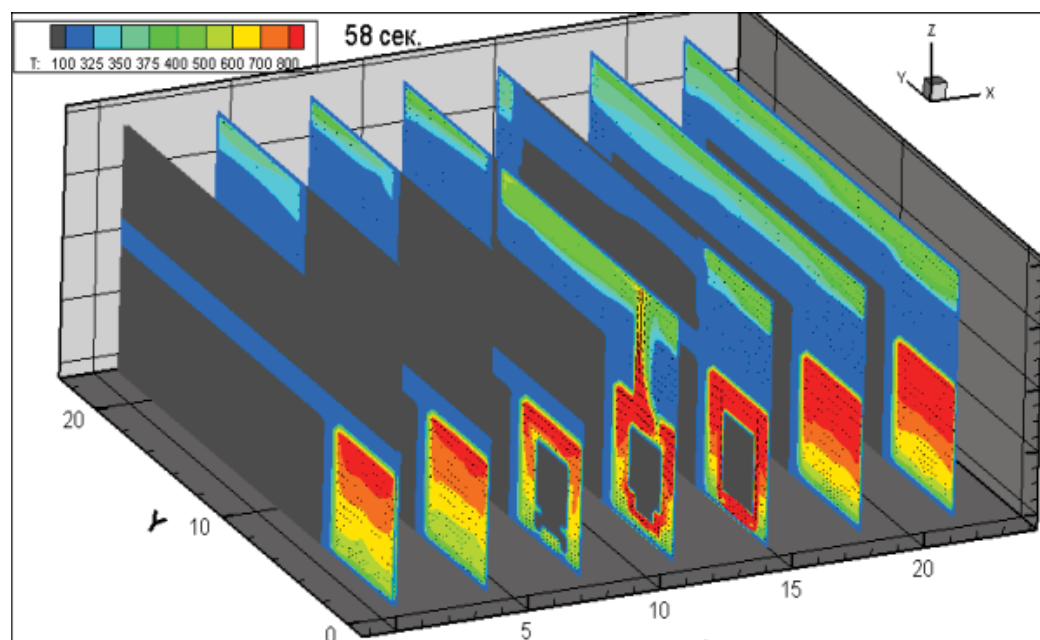


Рис. 8. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 58 сек
Fig. 8. Dynamics of absolute temperature K field propagation after 58 sec

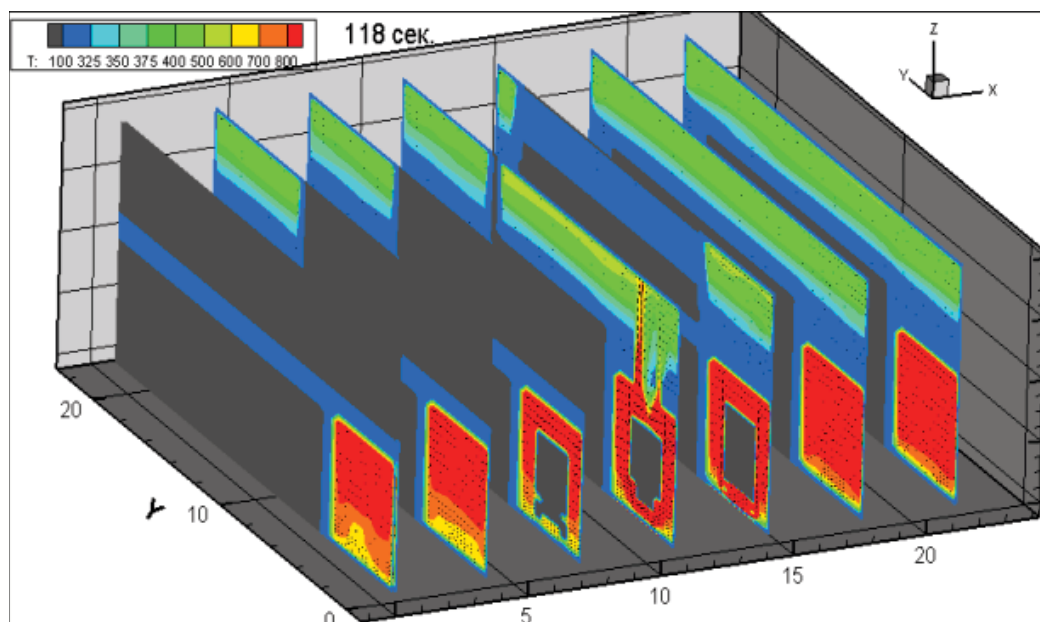


Рис. 9. Динамика распространения поля абсолютной температуры K через 118 сек
Fig. 9. Dynamics of absolute temperature K field propagation after 118 sec

Полученные в результате расчета по полевой модели параметры воздействия опасных факторов пожара могут использоваться для разработки мероприятий по обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений и радиационной безопасности перевозимых источников радиоактивности.

В анализах безопасности АЭС пожар рассматривается как исходное событие, которое в зависимости от частоты возникновения может быть отнесено как к проектным, так и к запроектным исходным событиям. При этом можно с большой уверенностью считать, что при возникновении проектных исходных событий, включая пожар, отказы строительных конструкций могут не рассматриваться как единичный отказ, поскольку, согласно п. 1.2.12 НП 001-15 [6] единичный отказ пассивного элемента без движущихся частей с вероятностью невыполнения функций безопасности менее 10^{-3} может не рассматриваться. Это убедительно показано в работе [7]. Также в работе [7] отмечено, что в случаях, когда можно показать достаточно высокую надежность строительных конструкций (например, для здания реакторного отделения), то дополнительных мер по защите их элементов от отказа по общим причинам путем использования принципов резервирования, независимости и разнообразия не требуется.

Важно отметить, что мероприятия по обеспечению безопасности блока АЭС при пожарах могут включать как меры по защите строительных конструкций и оборудования от воздействия опасных факторов пожара, так и меры, направленные на снижение вероятности возникновения пожара, и рассмотрение пожаров как запроектные исходные события. Согласно НП-001-15 [6] обоснования безопасности АЭС при запроектных исходных событиях должны выполняться в реалистичной постановке с использованием аттестованных программных средств.

Таким образом в данной статье описан методический подход по использованию полевого моделирования пожара для обоснования мероприятий по обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений с учетом временной пожарной нагрузки. Созданная и апробированная полевая модель динамики пожара предназначена для проведения расчетов с учетом специфики пожарной опасности и технологических особенностей атомной станции. Полевая модель динамики пожара оптимизирована с учетом специфики АЭС, осуществлена ее реализация в рамках комплекса программного обеспечения Fire Dynamics.

Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов, поэтому он широко может использоваться для определения/уточнения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкции помещений АЭС, в том числе с учетом временной пожарной нагрузки. Использование полевого метода позволяет рассчитать температуру, скорость, концентрации компонентов смеси в каждой точке расчетной области, а также применить полевой метод для определения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений, в том числе с учетом временной пожарной нагрузки.

Список литературы

1. Пуцев Д.И., Кривцов Ю.В., Грошев Ю.М., Лобанова Н.А. Оценка возможности применения полевого моделирования пожара для проведения расчетов пожаров в зданиях и помещениях // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):37–70. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-37-70/](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-37-70/)
2. Пуцев Д.И., Мишина С.Ю., Ткачев Е.А., Грошев Ю.М. Обоснование противопожарных мероприятий в помещении блочного щита управления АЭС с применением полевого моделирования пожара // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):87–102. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)
3. Пуцев Д.И., Беспалов А.В., Мишина С.Ю., Грошев Ю.М. Применение полевого моделирования пожара для обоснования эффективности конструктивной огнезащиты кабельных каналов в

помещениях АЭС // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;45(2):83–94. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2\(45\)-83-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2(45)-83-94)

4. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации. М.: ВНИИПО, 2003. 35 с.
5. Пожарная безопасность. Энциклопедия. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России, 2007. ISBN 5-901140-52-4.
6. НП 001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций [интернет]. Москва; 2016. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293756/4293756900.pdf>.
7. Юрьев Р.В., Иванов Д.В., Грошев Ю.М. К вопросу о надежности строительных конструкций атомных станций // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;46(3):113–120. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3\(46\)-113-120](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-113-120)
8. СП 13.13130.2009. «Атомные станции. Требования пожарной безопасности». М.: МЧС России. 2009.

References

1. Putsev D.I., Krivtsov Yu.V., Groshev Yu.M., Lobanova N.A. Evaluating feasibility of field modeling of fire to calculate fire characteristics in buildings and premises. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2023;37(2):37–70. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-37-70](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-37-70).
2. Putsev D.I., Mishina S.Yu., Tkachev E.A., Groshev Yu.M. Justification of fire protection measures in the NPP control room using CFD fire modeling. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2024;41(2):87–102. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)
3. Putsev D.I., Bepalov A.V., Mishina S.Yu., Groshev Yu.M. Application of field fire modeling to validate structural fire protection for cable ducts in nuclear power plants. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2025;45(2):83–94. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2\(45\)-83-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-2(45)-83-94)
4. Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires: Methodological recommendations [internet]. Moscow: VNIPO; 2003. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808018.pdf> (In Russian)
5. Fire Safety. Encyclopedia. Moscow: FGKU VNIPO EMERCOM of Russia, 2007. ISBN 5-901140-52-4. (In Russian)
6. NP 001-15. Federal norms and rules in the field of atomic energy use “General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants [internet]. Moscow; 2016. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293756/4293756900.pdf>. (In Russian)
7. Yuryev R.V., Ivanov D.V., Groshev Yu.M. On the reliability of construction structures at nuclear power plants. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2025;46(3):113–120. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3\(46\)-113-120](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-3(46)-113-120)
8. SP 13.13130.2009. Nuclear power plants. Fire safety requirements. Moscow: Ministry of Emergency Situations of Russia; 2009. (In Russian)

Информация об авторах / Information about the authors

Дмитрий Игоревич Пуцев, д-р техн. наук, генеральный директор ООО «Научно-технический центр «Промышленная и пожарная безопасность» (ООО «НТЦ ППБ»). Балашиха, Россия
e-mail: ntcpb@mail.ru

Dmitry I. Putsev, Dr. Sci. (Engineering), General Director, Scientific and Technical Centre “Industrial and Fire Safety” (NTC PPB). Balashikha, Russia e-mail: ntcpb@mail.ru

Роман Васильевич Юрьев, канд. техн. наук, заместитель директора по обоснованию безопасности – начальник управления, АО «Атомэнергопроект». Москва, Россия
e-mail: yurev_rv@aep.ru

Roman V. Yuryev, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Director for Safety Justification, Head of Department, JSC Atomenergoproekt. Moscow, Russia e-mail: yurev_rv@aep.ru

Юрий Михайлович Грошев*, канд. техн. наук, независимый исследователь. Москва, Россия
e-mail: Groshev52@gmail.com

Yuri M. Groshev*, Cand. Sci. (Engineering), Independent researcher. Moscow, Russia
e-mail: Groshev52@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ИЗУЧЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ МОДИФИЦИРОВАННЫХ БЕТОНОВ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

С.В. СОКОЛОВА^{1*}

¹ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», ул. Свободы, д.2 В, г. Самара, 443066, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Рассмотрены возможности повышения физико-механических характеристик бетонов специального назначения: жаростойких бетонов для ремонта футеровки керамзитообжигательных печей и гипсобетонов для изготовления стеновых панелей.

Цель. Исследование процессов структурной модификации специальных бетонов (жаростойких и гипсобетонов) с помощью извести в качестве добавки, вводимой для повышения их прочности и долговечности.

Материалы и методы. При подборе составов жаростойких бетонов использовались следующие материалы: глиноземистый цемент; песок, полученный дроблением керамического кирпича; гашеная известь – $\text{Ca}(\text{OH})_2$; ортофосфорная кислота с концентрацией 30 %. Образцы подвергались обжигу при температуре 800°C и испытывались на прочность с помощью гидравлического пресса. При подборе составов гипсобетона использовались следующие материалы: высокопрочный гипс; известь негашеная молотая – CaO . Проводились электронно-микроскопический и дифференциально-термический анализы. Образцы испытывались на прочность с помощью гидравлического пресса.

Результаты. Испытания образцов жаростойких бетонов, приготовленных на глиноземистом цементе с добавкой гашеной извести – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в количестве 10 % и подвергнутых пропитке ортофосфорной кислотой 30 %-ной концентрации показали предел прочности при сжатии 45 МПа.

В результате исследований образцов из гипсобетона было выявлено, что при включении в его состав 10 % негашеной молотой извести – CaO предел прочности при сжатии составил 373 кгс/см².

Выводы. Жаростойкие бетоны на глиноземистом цементе с добавкой гашеной извести – $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в количестве 10 %, пропитанные ортофосфорной кислотой с концентрацией 30 % обладают высокими физико-термическими показателями, удовлетворительными для работы бетона при температуре 800°C. Добавка в гипсобетон молотой негашеной извести в количестве 10 % от веса гипса повышает прочность материала ($R_{\text{сж}} = 373 \text{ кгс/см}^2$), что позволяет использовать его в производстве гипсобетонных панелей для стен промышленных и гражданских зданий.

Ключевые слова: огнеупоры, модификация, термостойкость, отходы промышленного производства, жаростойкие бетоны, высокопрочный гипс, известь

Для цитирования: Соколова С.В. Изучение физико-механических показателей модифицированных бетонов специального назначения // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 87–96. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-87-96](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-87-96) EDN: SVCLJU

Вклад автора

Соколова С.В. – разработка идеи, подготовка, проведение, обработка и анализ экспериментальных исследований; подбор, анализ и перевод иностранных источников, подбор графических материалов, подготовка рукописи статьи и ее окончательная редакция, систематизация материалов, оформление текста статьи, подбор, анализ и систематизация литературных источников.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.12.2025

Поступила после рецензирования 23.01.2026

Принята к публикации 30.04.2026

STUDY OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF SPECIAL-PURPOSE MODIFIED CONCRETES

S.V. SOKOLOVA^{1*}

¹Volga State University of Railway Transport, Svobody str., 2V, Samara, 443066, Russian Federation

Abstract

Introduction. The possibilities of increasing the physical and mechanical characteristics of special-purpose concretes are considered: heat-resistant concretes for repairing the lining of expanded clay kilns and concretes for making wall panels.

The aim is to study the processes of structural modification of special concretes (heat-resistant and gypsum concretes) using lime as an additive to increase their strength and durability.

Materials and methods. When selecting the compositions of heat-resistant concretes, the following materials were used: aluminous cement; sand obtained by crushing ceramic bricks; slaked lime – Ca(OH)_2 ; orthophosphoric acid with a concentration of 30 %. The samples were fired at a temperature of 800°C and tested for strength using a hydraulic press. When selecting the compositions of gypsum concrete, the following materials were used: high-strength gypsum; unslaked ground lime – CaO . Electron microscopic and differential thermal analyses were performed. The samples were tested for strength using a hydraulic press.

Results. Tests of heat-resistant concrete samples prepared on alumina cement with the addition of slaked lime – Ca(OH)_2 in an amount of 10 % and impregnated with orthophosphoric acid of 30 % concentration showed a compressive strength of 45 MPa.

As a result of studies of samples made of gypsum concrete, it was found that when 10 % of quicklime powder was added, the compressive strength was 373 kgf/cm².

Conclusions. Heat-resistant concretes on aluminous cement with an additive of lime-powder in the amount of 10 %, impregnated with orthophosphoric acid with a concentration of 30 %, have high physical and thermal characteristics, satisfactory for the operation of concrete at temperatures of 800°C. Adding ground quicklime to gypsum concrete at a rate of 10 % of the gypsum weight increases the material's strength [$R_{cr} = 373 \text{ kgf/cm}^2$], making it suitable for use in the production of gypsum concrete panels for industrial and civil buildings.

Keywords: refractories, modification, heat resistance, industrial waste, heat-resistant concretes, high-strength gypsum, lime

For citation: Sokolova S.V. Study of physical and mechanical properties of special-purpose modified concretes. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 87–96. [In Russian] [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-87-96](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-87-96) EDN: SVCLJU

Author contribution statement:

Sokolova S.V. – development of the idea, preparation, conduct, processing and analysis of experimental studies; selection, analysis and translation of foreign sources, selection of graphic materials, preparation of the manuscript of the article and its final editing, systematization of materials, design of the text of the article, selection, analysis and systematization of literary sources.

Funding

The study had no sponsorship.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 15.12.2025

Revised 23.01.2026

Accepted 30.04.2026

Введение

Приоритетным направлением технологического процесса современного строительства является использование эффективных строительных материалов, снижение материалоемкости, повышение механизации и индустриализации строительства [1–6]. Повышение эксплуатационных характеристик изделий, внедрение безотходных технологий в производство, использование отходов промышленных производств, создающих благоприятные условия для сохранения от загрязнений окружающей среды, являются актуальными проблемами в строительном комплексе [7–17]. Бетон, как универсальный строительный материал, применяется практически во всех областях специального производства [18–20]. Одним из наиболее доступных материалов является известь (известь негашёная комовая CaO , гашеная известь $Ca(OH)_2$), которую в качестве добавки можно применять в жаростойких бетонах как активатор химических процессов, и в гипсобетоне с целью увеличения прочности материала и защиты арматуры от коррозионных процессов [1].

Исследование процессов структурной модификации жаростойких бетонов и гипсобетона, полученных с использованием в качестве добавки гашеной извести $Ca(OH)_2$ (в жаростойких бетонах с последующей пропиткой H_3PO_4 30 %-ной концентрации) и негашеной молотой извести – CaO (в гипсобетонах) проводилось с целью повышения их прочности и увеличения долговечности.

Материалы и методы*Модификация жаростойких бетонов*

С целью изучения процесса структурной модификации жаростойких бетонов растворами фосфатов были применены бетоны на глиноземистом цементе и изучалось влияние пропитки ортофосфорной кислотой жаростойких бетонов на их физико-механические и термические свойства [1]. Опыты производили на образцах с размерами $50 \times 50 \times 50$ мм, пропитку которых производили в естественных условиях ортофосфорной кислотой с концентрацией 30 %. После пропитки образцы подвергали нагреванию при температуре 800°C с выдержкой в течение двух часов. После каждого нагрева измеряли и фиксировали плотность и прочность образцов при сжатии. Составы жаростойких бетонов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Составы жаростойких композитов

Table 1

Composition of heat-resistant composites

№ составов	Материалы	Масса, кг/м³	Класс бетона
I	Глиноземистый цемент	660	И-8
	Песок, полученный дроблением керамического кирпича	1340	
II	Глиноземистый цемент	600	И-8
	Песок, полученный дроблением керамического кирпича	1340	
	Гашеная известь – $Ca(OH)_2$ (5 %)	60	
III	Глиноземистый цемент	626	И-8
	Песок, полученный дроблением керамического кирпича	1340	
	Гашеная известь – $Ca(OH)_2$ (10 %)	34	

Модификация гипсобетона

Особое внимание уделяется развитию производства местных строительных материалов, среди которых гипсовые вяжущие занимают одно из первых мест.

Объективным условием для дальнейшего развития гипсовой промышленности являются многочисленные богатые месторождения гипсового камня, позволяющие почти повсеместно развивать производство и использование гипса во многих отраслях народного хозяйства и в первую очередь в строительстве [1].

Для изучения зависимости прочности гипсобетона на высокопрочном гипсе от добавки в качестве негашеной молотой извести изготавливались кубики с ребром 7 см чистого высокопрочного гипса и высокопрочного гипса с добавкой 5 и 10 % извести негашеной молотой – CaO .

Проводился электронно-микроскопический анализ. Препараты для просмотра готовились методом одноступенчатых самостоятельных угольно-платиновых реплик. Напыление производилось на поверхность свежего излома. Реплики просматривались при увеличении около 6000х. Просмотр большого количества участков позволил выявить некоторые закономерности в различии структуры гипсовой отливки в зависимости от добавки негашеной молотой извести и условий хранения образцов.

На рис. 1 приведена электронно-микрофотография образца из отливки высокопрочного гипса с добавкой 5 вес. % извести негашеной молотой.

В электронном микроскопе можно видеть картину преобладания мелких пластинчатых кристаллов двуводного гипса, а на отдельных участках – крупные кристаллы с нечеткими, расплывчатыми гранями (рис. 2).

Возможно это незаконченная кристаллизация двуводного гипса вокруг ядра кристаллизации.

На рис. 3 и рис. 4 приведены электронно-микрофотографии проб гипсовых отливок с добавкой 10 вес. % извести негашеной молотой.

На рис. 3 отчетливо видны крупные пластинчатого строения кристаллы двуводного гипса в достаточно плотной упаковке. На рис. 4 видны крупные кристаллы двуводного гипса многогранной формы.

Проводился дифференциально-термический анализ отливок с добавкой извести негашеной молотой, позволяющий получить кривые дифференциального анализа (ΔT). Скорость нагревания составляла 70° в минуту.



Рис. 1. Электронно-микрофотография образца из отливки высокопрочного гипса добавкой 5 вес. % извести негашеной молотой

Fig. 1. Electron micrograph of a sample from a high-strength gypsum casting with an additive of 5 wt. % of unslaked ground lime



Рис. 2. Электронно-микрофотография участка крупного кристалла из пробы, взятой из отливки из высокопрочного гипса с 5 вес. % извести негашеной молотой

Fig. 2. Electron micrograph of a large crystal from a sample taken from a cast of high-strength gypsum with 5 wt. % of unslaked ground lime



Рис. 3. Электронно-микрофотография пробы гипсовой отливки из высокопрочного гипса с добавкой 10 вес. % извести негашеной молотой, хранившейся в воздушно-сухих условиях

Fig. 3. Electron micrograph of a sample of a plaster casting made of high-strength plaster with an additive of 10 wt.% of ground quicklime stored in air-dry conditions



Рис. 4. Электронно-микрофотография пробы гипсовой отливки из высокопрочного гипса с добавкой 10 вес. % извести негашеной молотой, хранившейся в течение 3-х месяцев в среде с 80 % влажностью
Fig. 4. Electron micrograph of a sample of a high-strength plaster casting with an additive of 10 wt. % of ground quicklime, stored for 3 months in an environment with 80 % humidity

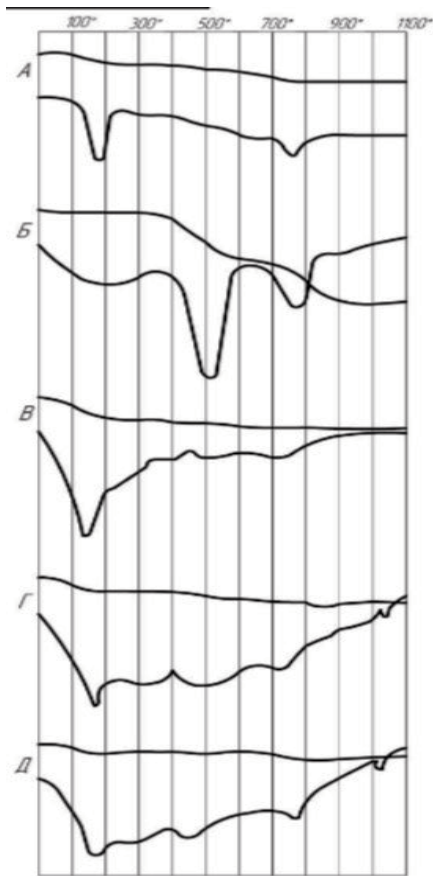


Рис. 5. Кривые ДТА: А – высокопрочный гипс; Б – известь; В – образец из отливки из высокопрочного гипса после 1 месяца хранения в воздушно-сухих условиях; Г – образец из отливки из высокопрочного гипса с добавкой 5 % извести после 1 месяца хранения в воздушно-сухих условиях; Д – образец из высокопрочного гипса с добавкой 10 % извести после 1 месяца хранения в воздушно-сухих условиях
Fig. 5. DTA curves: А – high-strength gypsum; Б – lime; В – sample from a high-strength gypsum casting after 1 month of storage in air-dry conditions; Г – sample from a high-strength gypsum casting with 5 % lime after 1 month of storage in air-dry conditions; Д – sample from a high-strength gypsum casting with 10 % lime after 1 month of storage in air-dry conditions

На рис. 5 приведены результаты анализа проб образцов, хранившихся в воздушно-сухих условиях, а на рис. 6 – проб тех же образцов, но хранившихся в течение 3-х месяцев в среде с относительной влажностью 80 %.

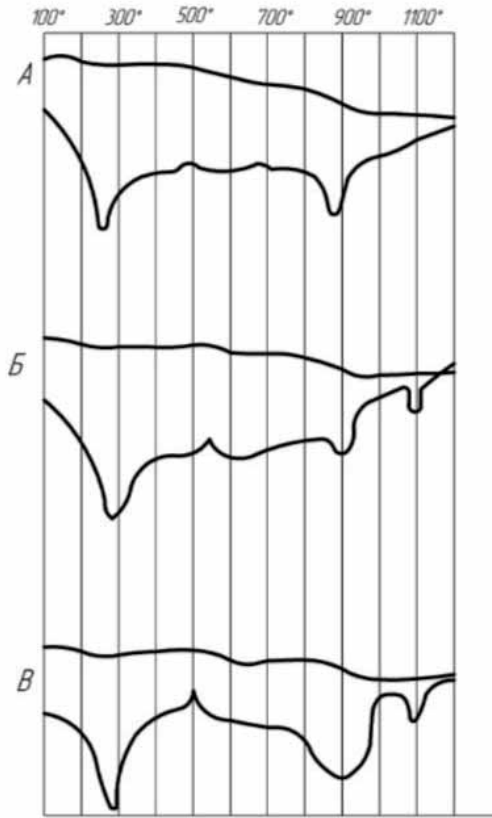


Рис. 6. Кривые ДТА образцов после 3-х месячного их хранения в условиях относительной влажности 80 %:
 А – высокопрочный гипс; Б – высокопрочный гипс + 5 % извести; В – высокопрочный гипс + 10 % извести

Fig. 6. DTA curves of samples after 3 months of storage at a relative humidity of 80 %:
 A – high-strength gypsum; B – high-strength gypsum + 5 % lime; C – high-strength gypsum + 10 % lime

Кривые почти одинаковы с одноименными ДТА, приведенными на рис. 5, только рассмотренные выше эффекты на них более четко выражены.

Результаты и обсуждение

Модификация жаростойких бетонов

Результаты испытаний на предел прочности при сжатии образцов жаростойких бетонов, приготовленных на глиноземистом цементе с добавкой и без добавки извести были следующие: первый состав: 32 МПа; второй состав: 42 МПа; третий состав: 45 МПа.

Таким образом, наибольшей прочностью обладают образцы на глиноземистом цементе, пропитанные ортофосфорной кислотой 30 %-ной концентрации, в составе которых присутствует гашеная известь $Ca(OH)_2$ в количестве 10 %.

Модификация гипсобетона

Как видно из рис. 5, кривая А свидетельствует об удалении гидратной воды и о дегидратации отдельных зерен двуводрата. Второй эндотермический эффект свидетельствует о полном обезвоживании гипса.

Кривая Б имеет два эндотермических эффекта. Первый при 500–550 °С, свидетельствующий о моменте потери гидратной воды, и второй при 800 °С, свидетельствующий о наличии в извести зерен карбоната.

Кривые В, Г и Д – схожи: они получены при термическом анализе гипсовых отливок с добавкой извести негашеной молотой в количестве от 0 до 10 вес. %.

Каждая из кривых характеризуется двумя основными эндотермическими эффектами: при 150 °С и при 800–950 °С.

Первый – это потеря гигроскопической и гидратной воды, а второй – диссоциация карбонатов. Эффект тем ярче, чем больше было количество добавки извести.

На средних частях кривых можно заметить экзотермический эффект при температуре около 450 °С. Возможно это момент превращения отдельных зерен растворимого ангидрита в нерастворимый.

Возможно наличие в отвердевшей отливке и новообразований в результате взаимодействия в процессе схватывания полуводного высокопрочного гипса и извести. Такие новообразования могут возникать на поверхности наиболее крупных кристаллов полуводного высокопрочного гипса.

Таким образом, добавка к гипсу негашеной молотой извести улучшает качество отливки.

Испытания образцов гипсобетона на предел прочности при сжатии дали следующие результаты: высокопрочный гипс без добавок – 353 кг/см²; высокопрочный гипс + 5 % извести негашеной молотой – 345 кг/см²; высокопрочный гипс + 10 % извести негашеной молотой – 373 кг/см².

Наибольшей прочностью обладают образцы высокопрочного гипса с 10 % добавкой извести негашеной молотой – *СаО*.

Выводы

1. С целью изучения процесса структурной модификации жаростойких бетонов растворами фосфатов были применены бетоны на глиноземистом цементе, пропитку которых производили ортофосфорной кислотой с концентрацией 30 %. Как показали проведенные опыты, наибольшей прочностью и меньшей усадкой после температурной обработки (800°С) обладают бетоны, пропитанные 30 % раствором ортофосфорной кислоты, в состав которых входит гашеная известь – $Ca(OH)_2$ (10 %).

2. При проектировании составов гипсобетонов, добавка в гипсовый раствор негашеной молотой извести ускоряет и улучшает раскристаллизацию основной массы раствора, что выражается в более четкой огранке кристаллов, в улучшении структуры в целом за счет карбонизации и уменьшения размеров пор; влажные условия хранения образцов ускоряют кристаллизацию гипса и карбонизацию $Ca(OH)_2$. Таким образом, введение негашеной извести в качестве модифицирующей добавки в гипсобетон повышает прочность и долговечность строительных изделий и конструкций.

Список литературы / References

1. Передерий И.А., Федоров В.П. Исследование коррозии стали в гипсобетоне на высокопрочном гипсе и электрохимическая защита // *Известия высших учебных заведений. Строительство и архитектура*. 1967. № 3. С. 20–25. [Perederij I.A., Fedorov V.P. The study of steel corrosion in gypsum concrete on high-strength gypsum and electrochemical. *News of Higher Educational Institutions. Construction and architecture*, 1967, no. 3, pp. 20–25. (In Russian)].
2. Alp I. et al. Potential use of pyrite cinders as raw material in cement production: Results of industrial scale trial operation. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, vol. 166, pp. 144–149. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2008.10.1293.
3. Abikak E.B., Kenzhaliyev B.K. Development of an integrated technology intended to process pyrite cinders using Chemical pre-activation. *NEWS Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan Ser. Geol. Tech. Sci.* 2022. Vol.3. Pp. 32–51. DOI: 10.32014/2022.2518-170x.178
4. Deryagin V.B. et al. Heat-resistant thermally insulating concretes with phosphate and aluminate binders. *Refractories and Industrial Ceramics*, 2011, vol. 52, no. 4, pp. 243–246. DOI: 10.1007/s11148-011-9406-x
5. Makaria K., Santhanam S. Micromechanical modeling of thermo-mechanical properties of high volume fraction particle-reinforced refractory composites using 3D Finite Element analysis. *Ceramics International*, 2020, vol. 46, pp. 4381–4393. DOI: 10.1016/j.ceramint.2019.10.162
6. Šavija B., Smith G.E., Liu D., Schlangen E., Flewitt P.E.J. Modelling of deformation and fracture for a model quasi-brittle material with controlled porosity: Synthetic versus real microstructure. *Eng. Fract. Mech.*, 2019, vol. 205, pp. 399–417. DOI: 10.1016/j.engfracmech.2018.11.008
7. Andreev K., Verstrynghe E., Wevers M. Compaction and shear failure of refractory mortars – effects of porosity and binder hardening. *J. Eur. Ceram. Soc.*, 2017, vol. 37, pp. 841–848. DOI: 10.1016/j.jeurceramsoc.2016.08.040
8. Nguyen T.T., André D., Huger M. Analytical laws for direct calibration of discrete element modelling of brittle elastic media using cohesive beam model. *Comput. Part. Mech.*, 2019, vol. 6, pp. 393–409. DOI: 10.1007/s40571-018-00221-0
9. Moreira M.H., Cunha T.M., Campos M.G.G., Santos M.F., Santos Jr.T., Andre D., Pandolfelli V.C. Discrete element modeling – A promising method for refractory microstructure design. *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 2020, vol. 99, no. 2, pp. 22–28.
10. Lohmann J., Kölzer T., Schaan G., Schmidt-Döhl F. Self-organizing systems in the construction industry. *Eng. Rep.*, 2023, vol. 5, no. 11. DOI: 10.1002/eng2.12692
11. Djobo J.N.Y., Stephan D. The reaction of calcium during the formation of metakaolin phosphate geopolymer binder. *Cement and Concrete Research*, 2022, vol. 158, pp. 168–172.
12. Luz A.P., Gomes D.T., Pandolfelli V.C. High-alumina phosphate-bonded refractory castables: $\text{Al}(\text{OH})_3$ sources and their effects. *Ceramics International*, 2015, vol. 41(7), pp. 9041–9050. DOI: 10.1016/j.ceramint.2015.03.276
13. Diaz I.G., Palomo J.G., Puertas F. Belite cements obtained from ceramic wastes and the mineral pair $\text{CaF}_2/\text{CaSO}_4$. *Cement Concr. Compos.*, 2011, vol. 33, no. 10, pp. 1063–1070.
14. Nishanth K.S., Naik P.A. Performance of concrete using lime sludge, rice-husk ash and foundry sand. *NMAMIT Annual Research Journal*, 2015, vol. 5, pp. 23–28.
15. Tkach E., Filimonova Y. Modified concrete for irrigation and drainage construction. *E3S Web of Conferences*, 2023, vol. 410. DOI:10.1051/e3sconf/202341001007
16. Yue L., Yan Z., Wei F., Weiwei D., Lei W. Recycling industrial wastes into self-healing concrete: A review. *Environmental Research*, 2022, vol. 214, part 4. p. 113975. DOI:10.1016/j.envres.2022.113975
17. Changzai R., Shuang W., Wenlong W., Lei C., Yonghui B., Tingting Z., Huan L., Yuxiao Z. Recycling of hazardous and industrial solid waste as raw materials for preparing novel high-temperature-resistant sulfoaluminate-magnesia aluminum spinel cement. *Journal of Building Engineering*, 2023, vol. 64, p.105550. DOI:10.1016/j.job.2022.105550
18. Geraldo R.H. Calcination parameters on phosphogypsum waste recycling / R.H. Geraldo, A.R.D. Costa, J. Kanai, et al. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 256, p. 119406. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2020.119406
19. Runfeng L., Yang Z., Cuiwei L., Shibo L., Zhenying H. Recycling of industrial waste iron tailings in porous bricks with low thermal conductivity. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 213, pp. 43–50. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2019.04.040.

20. Chang S., Lulu C., Jianzhuang X., Amardeep S., Jiahao Z. Compound utilization of construction and industrial waste as cementitious recycled powder in mortar. *Resources, Conservation and Recycling*, 2021, vol. 170, p.105561. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105561>

Информация об авторе/Information about the author

Светлана Владимировна Соколова, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Железнодорожный путь и строительство» ФГБОУ ВО «Приволжский государственный университет путей сообщения», Самара
e-mail: sokolova9967@mail.ru

Svetlana V. Sokolova*, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the department «Volga State University of Railway Engineering», Samara
e-mail: sokolova9967@mail.ru

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПЕСКОВ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ ХЛОРИДОВ В ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЯХ

В.Ф. СТЕПАНОВА¹, д-р техн. наук

Н.А. СПИВАК¹, канд. техн. наук

Л.П. ХАРИТОНОВА¹

¹ Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Песок многих месторождений, особенно Дальнего Востока нашей страны, содержит большое количество хлоридов, что не позволяет использовать его в составе железобетона. Связано это с тем, что хлорид-ионы являются наиболее агрессивным коррозионным агентом по отношению к стальной арматуре. В лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева были проведены исследования процесса коррозии стальной арматуры в бетоне и цементно-песчаной смеси, в состав которых входил песок с высоким содержанием хлоридов.

Цель. Определение возможности использования песка месторождений Камчатского края в составе бетонов с точки зрения коррозионной агрессии к стальной арматуре.

Материалы и методы. Исследования проводились на модельной цементно-песчаной смеси (ЦПС) и бетоне с гладкой стержневой арматурой диаметром 6 мм. Песок содержал 0,08 % масс (в пересчете на ион хлора) водорастворимых хлоридов и 0,55 % масс (в пересчете на ион хлора) общее количество хлоридов в песке. Для исследований был применен электрохимический метод ускоренного определения коррозионного действия среды на стальную арматуру. Метод основан на получении зависимости плотности электрического тока от электрического потенциала стальной арматуры – потенциодинамический метод.

Результаты. Исследованный песок с высоким содержанием нерастворимых в воде хлоридов не вызывает коррозии стальной арматуры при нахождении образцов в неагрессивной (нейтральной) среде. В исходном состоянии и выдержке в режиме «увлажнение – высушивание» в течение 3, 6 месяцев ни в образцах цементно-песчаной смеси, ни в образцах бетона плотность тока при потенциале плюс 300 мВ, не превысила 10 мкА/см², а также потенциал через (60±5) с после отключения тока не снизился ниже + 5 мВ.

Выводы. Песок с повышенным содержанием нерастворимых в воде хлоридов можно рекомендовать для использования в железобетонных конструкциях, гарантированно не контактирующих с агрессивной средой даже в процессе эксплуатации.

Ключевые слова: коррозия, песок, цементно-песчаная смесь, хлориды, железобетон, стальная арматура, потенциодинамический метод, композитная арматура

Для цитирования: Степанова В.Ф., Спивак Н.А., Харитонов Л.П. О возможности использования песков с высоким содержанием хлоридов в железобетонных конструкциях // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 97–104. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-97-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-97-104) EDN: EOLUMR

Вклад авторов

Степанова В.Ф. – подготовка программы испытаний, анализ результатов исследований.

Спивак Н.А. – подготовка программы испытаний, анализ результатов, проведение экспериментальных исследований.

Харитонов Л.П. – проведение экспериментальных исследований.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила в редакцию 16.04.2026

Поступила после рецензирования 04.06.2026

Принята к публикации 11.06.2026

ON THE POSSIBILITY OF USING SANDS WITH HIGH CHLORIDE CONTENT IN REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

V.F. STEPANOVA¹, DR. SCI. (ENGINEERING)

N.A. SPIVAK¹, CAND. SCI. (ENGINEERING)

L.P. KHARITONOVA¹

¹ Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. The sand of many deposits, especially in the far east of our country, contains a large amount of chlorides, which makes it unsuitable for use in reinforced concrete. This is because chloride ions are the most aggressive corrosive agent for steel reinforcement. The Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures at the A.A. Gvozdev Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete Structures conducted research on the corrosion of steel reinforcement in concrete and cement-sand mixtures that contained sand with a high chloride content.

Aim. To determine the possibility of using sand from the Kamchatka Territory deposits in concrete mixtures in terms of corrosion aggression to steel reinforcement.

Materials and methods. The studies were conducted on a model cement-sand mixture (CPM) and concrete with smooth rod reinforcement of 6 mm in diameter. The sand contained 0.08 % by mass (based on chlorine ion) of water-soluble chlorides and 0.55 % by mass (based on chlorine ion) of total chlorides in the sand. An electrochemical method was used to accelerate the determination of the corrosion effect of the environment on steel reinforcement. The method is based on obtaining the dependence of the electric current density on the electric potential of the steel reinforcement, which is known as the potential-dynamic method.

Results show that sand with a high content of water-insoluble chlorides does not cause corrosion of steel reinforcement when the samples are in a non-aggressive (neutral) environment. In the initial state and exposure in the humidification – drying mode for 3, 6 months, neither in the cement-sand mixture samples nor in the concrete samples, the current density at a potential of plus 300 mV did not exceed 10 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$, as well as the potential after (60 ± 5) s after the current was turned off did not drop below + 5mV.

Conclusions. Sand with a high content of water-insoluble chlorides can be recommended for use in reinforced concrete structures that are guaranteed to be free from aggressive environments even during operation.

Keywords: corrosion, sand, cement-sand mixture, chlorides, reinforced concrete, steel reinforcement, potentiodynamic method, composite reinforcement

For citation: Stepanova V.F., Spivak N.A., Kharitonova L.P. On the possibility of using sands with high chloride content in reinforced concrete structures. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 97–104. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-97-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-97-104) EDN: EOLUMR

Authors contribution statement

Stepanova V.F. – preparation of the test program, analysis of research results.

Spivak N.A. – preparation of the test program, analysis of the results of experimental studies.

Kharitonova L.P. – conducting experimental research.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 16.04.2026

Revised 04.06.2026

Accepted 11.06.2026

Введение

Песок различается по месту добычи: речной, морской, карьерный. Если карьерный и речной пески, как правило, содержат мало хлоридов, то морской песок имеет высокое или очень высокое содержание хлоридов. По ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ» [1] содержание водорастворимых хлоридов не должно быть более 0,15 % масс.

В российских и зарубежных стандартах содержание хлоридов в бетоне и железобетоне ограничено. Так, нормами допускается содержание хлоридов в бетоне не более 1,0 % масс. по отношению к массе цемента, в Российской Федерации в соответствии с СП 28.13330.2017 [2], в США с ACI 318-14 [3], в Европе с EN 206-1-2013 [4]. В железобетоне с ненапрягаемой арматурой не более 0,4 % масс. по отношению к массе цемента в РФ и Европе; не более 0,15 % масс. – в США. Связано это с тем, что хлорид-ионы являются наиболее агрессивным коррозионным агентом по отношению к стальной арматуре. Коррозия арматуры при повышенном содержании хлоридов в железобетоне может начинаться сразу после изготовления конструкций, что приводит к преждевременному разрушению конструкций.

Песок содержит два вида хлоридов: водорастворимые (большинство неорганических хлоридов) и нерастворимые в воде хлориды. Водорастворимые хлориды можно удалить из песка промывкой и снизить их содержание ниже требуемых 0,15 %. С нерастворимыми хлоридами несколько сложнее и получить требуемые не более 0,4 % в железобетоне практически невозможно уже при 0,4 % содержания хлоридов в песке.

В нашей стране есть много областей (и достаточно больших, например, Камчатский край), где есть только морской песок с высоким содержанием хлоридов, а так как использование железобетона в строительстве происходит и в этих приморских областях, песок приходится завозить издалека.

Материалы и методы

Сотрудниками НИИЖБ им. А.А. Гвоздева были проведены исследования по влиянию нерастворимых хлоридов в песке на процесс коррозии стальной арматуры. Исследования проводились на модельной цементно-песчаной смеси (ЦП) и бетоне с гладкой стержневой арматурой диаметром 6 мм. Песок содержал 0,08 % масс. (в пересчете на ион хлора) водорастворимых хлоридов и 0,55 % масс (в пересчете на ион хлора) общее количество хлоридов в песке. Для исследований были приготовлены: ЦП смесь с содержанием хлоридов 1,5 % масс в пересчете на ион хлора к массе це-

мента и бетон с содержанием хлоридов 1,5 % масс в пересчете на ион хлора к массе цемента. Изготовление и испытания образцов проводились по ГОСТ 31383-2008 [5]. Для исследований был применен электрохимический метод ускоренного определения коррозионного действия среды на стальную арматуру. Метод основан на получении зависимости плотности электрического тока от электрического потенциала стальной арматуры – потенциодинамический метод.

Сформованные образцы призмы ЦПС $4 \times 4 \times 16$ см и бетона $7 \times 7 \times 14$ см выдерживались 28 суток в камере нормального твердения. При измерениях в каждом опыте использовали три параллельных образца. Перед снятием поляризационных кривых образцы вакуумировались и насыщались водой. Подготовленный образец устанавливали в электрохимическую ячейку. По полученным результатам строили поляризационную кривую в координатах: плотность тока i , мкА/см²– потенциал рабочего электрода E , мВ.

Коррозионное состояние стальной арматуры определяли по показателям, приведенным в ГОСТ 31383-2008 в сроки:

1. сразу после изъятия из камеры нормального твердения;
2. через 3 месяца выдержки в режиме водонасыщения–высушивания;
3. через 6 месяцев выдержки в режиме водонасыщения–высушивания. Результаты испытаний приведены в таблицах 1, 2.

Таблица 1

Результаты испытаний образцов цементно-песчаной смеси

Table 1

Test results of cement-sand mixture samples

Показатель	Образцы цементно-песчаной смеси		
	исходное состояние	через 3 месяца	через 6 месяцев
Плотность тока при потенциале плюс 300 мВ, мкА/см ²	5,8	1,9	0,9
Потенциал через (60±5) с после отключения тока, мВ	+300	+510	+540
Коррозионное состояние стального стержня	Пассивное состояние	Пассивное состояние	Пассивное состояние

Таблица 2

Результаты испытаний образцов бетона

Table 2

Test results of concrete samples

Показатель	Образцы бетона		
	исходное состояние	через 3 месяца	через 6 месяцев
Плотность тока при потенциале плюс 300 мВ, мкА/см ²	2,5	1,1	0,9
Потенциал через (60±5) с после отключения тока, мВ	+420	+510	+540
Коррозионное состояние стального стержня	Пассивное состояние	Пассивное состояние	Пассивное состояние

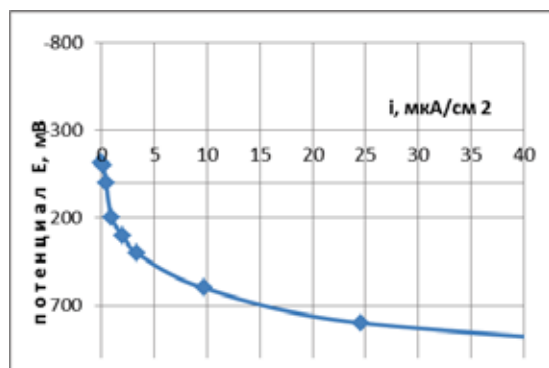


Рис. 1. Анодные поляризационные кривые стали в бетоне в исходном состоянии
Fig. 1. Anodic polarization curves of steel in concrete in the initial state

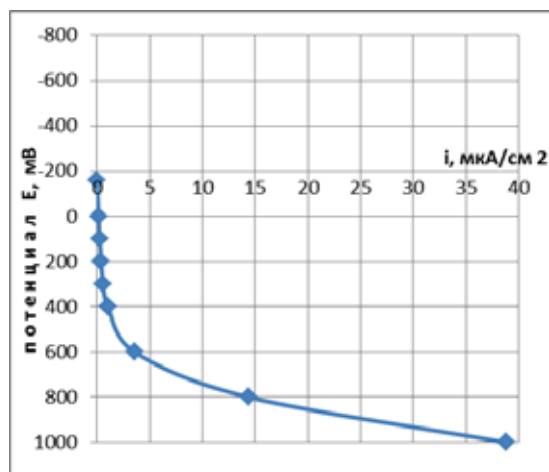


Рис. 3. Анодные поляризационные кривые стали в бетоне после 6 месяцев испытаний в режиме переменного увлажнения и высушивания
Fig. 3. Anodic polarization curves of steel in concrete after 6 months of testing under variable wetting and drying conditions

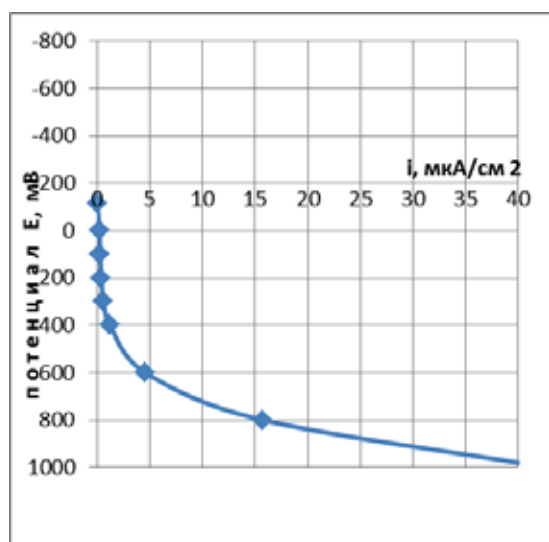


Рис. 2. Анодные поляризационные кривые стали в бетоне после 3 месяцев испытаний в режиме переменного увлажнения и высушивания
Fig. 2. Anodic polarization curves of steel in concrete after 3 months of testing under variable wetting and drying conditions

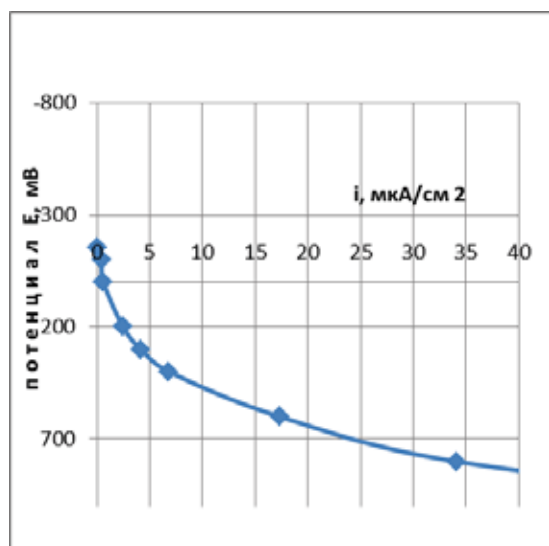


Рис. 4. Анодные поляризационные кривые стали в растворных образцах в исходном состоянии
Fig. 4. Anodic polarization curves of steel in solution samples in the initial state

На рис. 7 показано состояние стальной арматуры после выдержки в песчаном грунте, содержащем 0,25 % водорастворимого хлорида в течение 3 месяцев: видимая коррозия. На рис. 8 показано состояние стальной арматуры в образцах ЦПС и бетона с высоким содержанием не растворимых в воде хлоридов после выдержки в течение 6 месяцев в режиме водонасыщения высушивания: коррозия отсутствует.

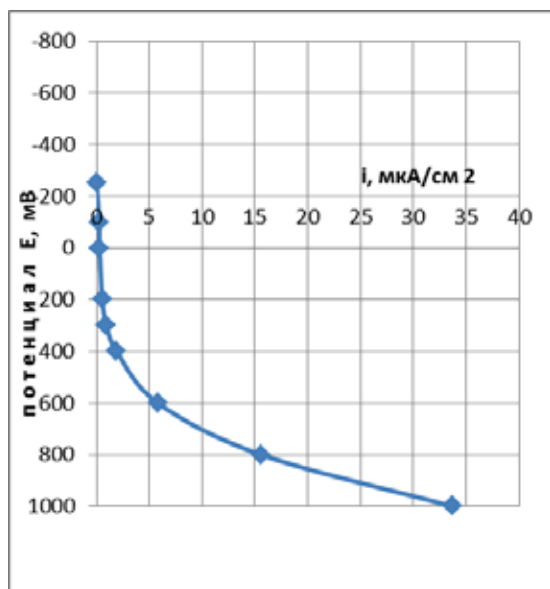


Рис. 5. Анодные поляризационные кривые стали в растворных образцах после 3 месяцев испытаний в режиме переменного увлажнения и высушивания

Fig. 5. Anodic polarization curves of steel in solution samples after 3 months of testing in a mode of alternating humidification and drying

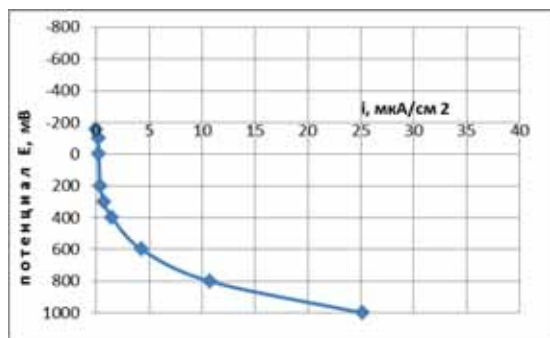


Рис. 6. Анодные поляризационные кривые стали в растворных образцах после 6 месяцев испытаний в режиме переменного увлажнения и высушивания

Fig. 6. Anodic polarization curves of steel in solution samples after 6 months of testing in a mode of alternating humidification and drying



Рис. 7. Состояние стального стержня после 3 месяцев выдержки в среде неполного водонасыщения в грунте – засоленный песок с содержанием 0,25 % хлористого натрия

Fig. 7. The condition of the steel rod after 3 months of exposure to an environment of incomplete water saturation in the soil is saline sand with a 0.25% sodium chloride content



Рис. 8. Состояние стержней из образцов цементно-песчаной смеси через 6 месяцев в режиме увлажнения – высушивания

Fig. 8. The condition of the rods from the cement-sand mixture samples after 6 months of wetting and drying

Закключение

По результатам проведенных исследований песок с высоким содержанием нерастворимых в воде хлоридов не вызывает коррозии стальной арматуры при нахождении

образцов в неагрессивной (нейтральной) среде. В исходном состоянии и выдержке в режиме увлажнения – высушивания в течение 3, 6 месяцев ни в образцах цементно-песчаной смеси, ни в образцах бетона плотность тока при потенциале плюс 300 мВ, не превысила 10 мкА/см², а также потенциал через (60±5) с после отключения тока не снизился ниже + 5мВ. Это говорит о том, что такие смеси и бетон не вызывают коррозии арматурных стержней. Тем не менее, неагрессивная среда – это достаточно редкий случай, особенно если рассматривать весь жизненный цикл строительной конструкции. С течением времени нейтральная среда может превратиться в агрессивную, которая переведет нерастворимые в воде хлориды в водорастворимые и запустит процесс коррозии стальной арматуры. Таким образом, песок с повышенным содержанием нерастворимых в воде хлоридов можно рекомендовать для использования в железобетонных конструкциях, гарантированно не контактирующих с агрессивной средой даже в процессе эксплуатации. В агрессивных средах и потенциально агрессивных можно рекомендовать такой песок для использования в бетоне, армированном композитной арматурой, что вероятно окажется намного экономически выгоднее использования привозного песка в сочетании с металлической арматурой.

Одним из путей решения вопроса о применении засолённых песков в железобетонных конструкциях является замена стальной арматуры на арматуру композитную полимерную ГОСТ 31938-2022 [6], что, в свою очередь, позволит сократить затраты на транспортировку чистого песка, облегчит вес конструкций и обеспечит длительную безремонтную эксплуатацию. Для расчета и проектирования конструкций, армированных композитной полимерной арматурой, следует руководствоваться СП 295.1325800.2017 [7].

Список литературы

1. ГОСТ 8736-2014 «Песок для строительных работ». Москва: Стандартинформ. 2015.
2. СП 28.13330.2017 «Защита строительных конструкций от коррозии». Москва: Росстандарт. 2017.
3. ACI 318-14 «Building Code Requirements for Structural Concrete». American Concrete Institute. 2015
4. EN 206-1-2013 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, IDT.
5. ГОСТ 31383-2008 «Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний». Москва: Стандартинформ. 2010.
6. ГОСТ 31938-2022 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций». Москва: Российский институт стандартизации. 2022.
7. СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования». Москва: Росстандарт. 2018.

References

1. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform. 2015. (In Russian)
2. SP 28.13330.2017 Protection against corrosion of construction. Moscow: Rosstandart. 2017. (In Russian)
3. ACI 318-14 Building Code Requirements for Structural Concrete. American Concrete Institute. 2015.
4. EN 206-1-2013 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, IDT
5. State Standard 31383-2008 Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete constructions. Test methods. Moscow: Standartinform. 2010. (In Russian)
6. State Standard 31938-2022 Fiber-reinforced polymer bars for reinforcing concrete structures. General specifications. Moscow: Russian Institute of Standardization. 2022. (In Russian)
7. SP 295.1325800.2017 Concrete structures reinforced with fibre-reinforced polymer bars. Design rules. Moscow: Rosstandart. 2018. (In Russian)

Информация об авторах / Information about the authors

Валентина Федоровна Степанова, научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», доктор технических наук, профессор, научный руководитель лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

e-mail: vfstepanova@mail.ru

Valentina F. Stepanova, Dr. Sci. (Engineering), professor, scientific director of laboratory, corrosion and durability of concrete and reinforced concrete structures, RIRC A.A. Gvozdev, JSC RCC Construction. Moscow, Russian Federation

e-mail: vfstepanova@mail.ru

Николай Александрович Спивак*, научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», кандидат технических наук, заведующий сектором технологии ремонтно-строительных работ с применением полимеров лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

e-mail: nisan.52@mail.ru

Nikolay A. Spivak, Cand. Sci. (Engineering), head of the polymer technology sector at laboratory corrosion and durability of concrete and reinforced concrete structures, RIRC A.A. Gvozdev, JSC RCC Construction. Moscow, Russian Federation

e-mail: nisan.52@mail.ru

Людмила Петровна Харитоновна, научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт бетона и железобетона (НИИЖБ) им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», младший научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»

e-mail: cezi2008@yandex.ru

Lyudmila P. Kharitonova, junior researcher at laboratory corrosion and durability of concrete and reinforced concrete structures, RIRC A.A. Gvozdev, JSC RCC Construction. Moscow, Russian Federation

e-mail: cezi2008@yandex.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ОСНОВЫ РАЗВИТИЯ ГЕОТЕХНИЧЕСКОГО И ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГОВ ПРИБРЕЖНОЙ ЗОНЫ И АКВАТОРИИ СЕВЕРНОГО МОРСКОГО ПУТИ

А.Г. АЛЕКСЕЕВ^{1*}, д-р техн. наук

В.Г. КРЮЧКОВ², д-р экон. наук

М.Н. ЖЕЛЕЗНЯК³, член-корреспондент РАН, д-р геол.-минерал. наук

Л.И. ЛОБКОВСКИЙ^{4, 5, 6}, академик РАН, д-р физ.-мат. наук, профессор

И.П. СЕМИЛЕТОВ^{7, 8, 9}, член-корреспондент РАН, д-р геогр. наук

¹ ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, г. Москва, 109428, Российская Федерация

³ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, ул. Мерзлотная, д. 36, г. Якутск, 677010, Российская Федерация

⁴ Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр-т, д. 36, г. Москва, 117997, Российская Федерация

⁵ Научно-технологический университет «Сириус», Олимпийский пр-т, д. 1, Федеральная территория «Сириус», 354349, Российская Федерация

⁶ Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, г. Москва, 117997, Российская Федерация

⁷ Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, ул. Балтийская, д. 43, Приморский край, г. Владивосток, 690041, Российская Федерация

⁸ Национальный исследовательский Томский государственный университет, проспект Ленина, д.36, Томская область, г. Томск, 634050, Российская Федерация

⁹ Институт экологии, Высшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, г. Москва, 109028, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Статья посвящена мониторингу состояния многолетнемерзлых грунтов в Арктической зоне Российской Федерации. Интенсивное освоение Арктики в совокупности с изменением климата приводят к деградации мерзлоты и снижению устойчивости сооружений в данном регионе. Указываются высокие темпы повышения температуры воздуха и грунтов прибрежной зоны и акватории Северного морского пути.

Цель. Анализ состояния системы мониторинга вечной мерзлоты и предложения по созданию системы геотехнического и экологического мониторингов прибрежной зоны и акватории Северного морского пути.

Материалы и методы. В статье приведены основные аспекты проведения геотехнического мониторинга: оценка, контроль и прогноз теплового состояния вечноммерзлых грунтов и оценка несущей способности фундаментов инженерных сооружений.

Результаты. Отмечается несистемный подход к мониторингу мерзлых грунтов несмотря на имеющуюся нормативную базу и техническое обеспечение. Указывается необходимость создания комплексной системы государственного мониторинга.

Выводы. Обосновывается необходимость проведения фонового мониторинга экологических и климатических последствий деградации наземной и подводной мерзлоты. Даются рекомендации по мониторингу в ключевых районах наземной мерзлоты, включая прибрежную Арктическую зону и подводную мерзлоту в прибрежной зоне и на акватории Северного морского пути.

Ключевые слова: многолетнемерзлые грунты, Северный морской путь, геотехнический, экологический мониторинг, фоновый мониторинг, подводная мерзлота, прибрежная Арктическая зона

Для цитирования: Алексеев А.Г., Крючков В.Г., Железняк М.Н., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. Основы развития геотехнического и экологического мониторингов прибрежной зоны и акватории Северного морского пути // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2026. № 2(49). С. 105–122. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-105-122](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-105-122) EDN: IURBNV

Вклад авторов

А.Г. Алексеев – разработка концепции и методологии исследования, корректировка материала.

В.Г. Крючков – сбор и анализ данных.

М.Н. Железняк – редактирование и корректировка материала.

Л.И. Лобковский – принятие ключевых решений, лежащих в основе исследования.

И.П. Семилетов – написание текста статьи.

Финансирование

Статья не имела стороннего финансирования.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.01.2026

Поступила после рецензирования 27.02.2026

Принята к публикации 05.03.2026

FUNDAMENTALS OF THE DEVELOPMENT OF GEOTECHNICAL AND ENVIRONMENTAL MONITORING OF THE COASTAL ZONE AND THE WATER AREA OF THE NORTHERN SEA ROUTE

A.G. ALEKSEEV¹, Dr. Sci. [Engineering]

V.G. KRYUCHKOV², Dr. Sci. [Economy]

M.N. ZHELEZNYAK³, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. [Geology and Mineralogy]

L.I. LOBKOVSKY^{4, 5, 6}, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. [Physico-Mathematical], Professor

I.P. SEMILETOV^{7, 8, 9}, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. [Geography]

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

² JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, Moscow, 109428, Russian Federation

³ Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Merzlotnaya str., 36, Yakutsk, 677010, Russian Federation

⁴ Shirshov Institute of Oceanology of Russian Academy of Sciences, Nakhimovsky Prospekt, 36, Moscow, 117997, Russian Federation

⁵ Sirius University of Science and Technology, Olimpiyskiy Prospekt, 1, Federal Territory of Sirius, 354349, Russian Federation

⁶ Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics Russian Academy of Sciences, Profsoyuznaya st., 84/32, Moscow, 117997, Russian Federation

⁷V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute Far Eastern Branch Russian Academy of Sciences, Baltiyskaya str., 43, Primorsky Krai, Vladivostok, 690041, Russian Federation

⁸National Research Tomsk State University, Lenina street, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation

⁹Institute of Ecology, Higher School of Economics, Pokrovskii street, Moscow, 109028, Russian Federation

Abstract

Introduction. The article is devoted to monitoring the condition of permafrost soils in the Arctic zone of the Russian Federation. Intensive development of the Arctic combined with climate change leads to permafrost degradation and reduced stability of structures in the region. High rates of temperature drop in the air and soil of the coastal zone and the water area of the Northern Sea Route are indicated.

Aim. Analysis of the state of the permafrost monitoring system and proposals for the creation of a system of geotechnical and environmental monitoring of the coastal zone and the water area of the Northern Sea Route.

Materials and methods. The article presents the main aspects of geotechnical monitoring: assessment, control and forecast of the thermal condition of permafrost soils and assessment of the bearing capacity of foundations of engineering structures.

Results. There is an unsystematic approach to monitoring frozen soils, despite the existing regulatory framework and technical support. The necessity of creating a comprehensive system of state monitoring is indicated.

Conclusions. The necessity of background monitoring of the ecological and climatic consequences of the degradation of terrestrial and underwater permafrost is substantiated. Recommendations are given on monitoring in key areas of ground permafrost, including the coastal Arctic zone and underwater permafrost in the coastal zone and in the waters of the Northern Sea route.

Keywords: permafrost soils, Northern Sea route, geotechnical, environmental monitoring, background monitoring, underwater permafrost, coastal Arctic zone

For citation: Alekseev A.G., Kryuchkov V.G., Zheleznyak M.N., Lobkovsky L.I., Semiletov I.P. Fundamentals of the development of geotechnical and environmental monitoring of the Coastal zone and the water area of the Northern Sea route. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2(49), pp. 105–122. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-105-122](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-105-122) EDN: IURBNV

Funding

The study had no sponsorship.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Authors contribution statement

A.G. Alekseev – development of the research concept and methodology, correction of the material.

V.G. Kryuchkov – data collection and analysis.

M.N. Zheleznyak – editing and correction of the material.

L.I. Lobkovsky – making key decisions underlying the research.

I.P. Semiletov – writing the text of the article.

Received 15.01.2026

Revised 27.02.2026

Accepted 05.03.2026

Введение

Изменение климата, которое отмечается в последнее время, существенным образом сказывается на температурном состоянии вечной мерзлоты, в том числе в акватории Северного морского пути. Согласно климатическим исследованиям, в север-

ных широтах Западной Сибири начиная с 1970-х годов были зарегистрированы темпы повышения температуры мерзлых пород в диапазоне от 0,05 до 0,07 °С/год [1]. Ряд исследований, посвященных проблемам мониторинга вечной мерзлоты в Западной и Восточной Сибири [2, 4, 5, 6, 7] и др., показывает наличие устойчивого тренда потепления климата, что приводит к усилению деформаций поверхности почв в зоне распространения вечной мерзлоты. Это особенно актуально для нашей страны, где около 70 % территории содержит многолетнемерзлые породы (далее – мерзлота) в различных формах, а в морях Восточной Арктики (Лаптевых, Восточно-Сибирское, Чукотское) и в Карском море содержится более 80 % всей подводной мерзлоты на планете, а также огромные запасы углеводородов, включая газовые гидраты [8, 9, 10, 11]. Следовательно, устойчивое социально-экономическое развитие большей части территории РФ в будущем можно спрогнозировать, применяя научно обоснованные рекомендации, которые могут быть разработаны на основе развития геотехнического и экологического мониторингов мерзлоты в арктической системе «суша–шельф». Для этого необходимо проведение хорошо организованных, высокотехнологичных комплексных исследований, направленных на изучение климатических и экологических последствий деградации мерзлоты, которые приводят к **опасным природным явлениям – георискам**, а также к серьезным социально-экономическим последствиям.

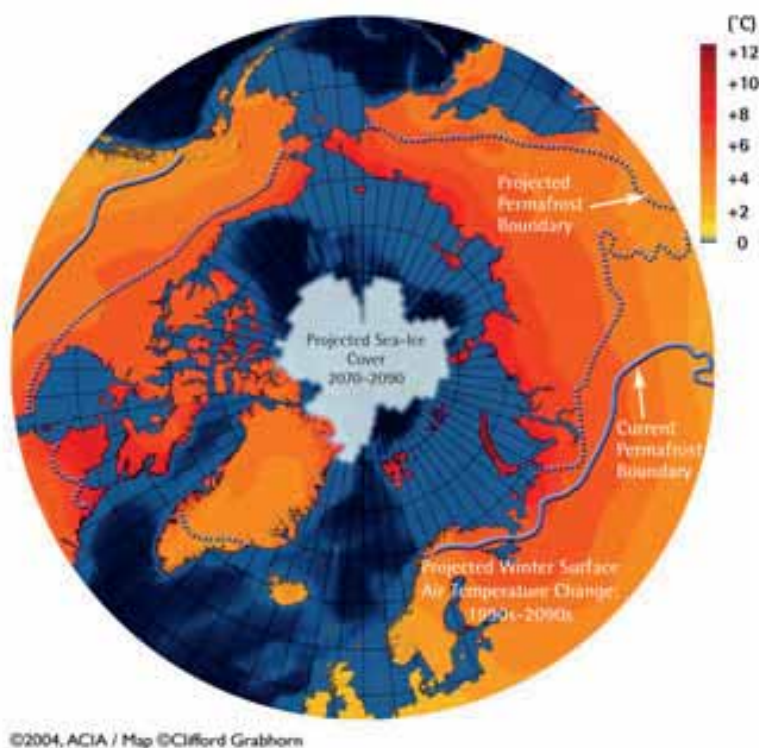


Рис. 1. Предполагаемые изменения в криосфере Северного полушария, 1990–2090 гг. [12]
Fig. 1. Estimated changes in the cryosphere of the Northern Hemisphere, 1990–2090 [12]

Согласно авторитетным экспертным оценкам [12] предполагается, что к 2090 году площадь мерзлоты в Российской Федерации уменьшится примерно в 2 раза, что приведет

к полному исчезновению мерзлоты в европейской части РФ и значительному сдвигу границы мерзлоты Сибири к северу, а в Северной Америке площадь мерзлоты уменьшится примерно в 4 раза (пунктирная линия на рис. 1). Деградация наземной мерзлоты будет сопровождаться повышением температуры воздуха в зимний период на 2–12 °С с усилением потепления к северу, что может привести к полному отсутствию ледяного покрова на арктическом шельфе и материковом склоне (рис. 1).

Результаты наблюдений свидетельствуют о том, что этот прогнозный сценарий начинает выполняться намного более высокими темпами: потепление климата уже составило около 2,8 °С (1970–2018 гг.) [14]. Более того, показано, что деградация мерзлоты вызвала активное развитие растительного покрова и смещение границ биоклиматических зон к северу на 30–40 км (1975–2018 гг.), а среднегодовая температура наземной мерзлоты на глубине 10–12 м увеличивается со скоростью от 0,03 до 0,06 °С/год, что близко к тренду повышения температуры воздуха от 0,05 до 0,07 °С/год в регионе Западной Сибири [1].

В работе [13], обобщающей результаты измерений состояния наземной мерзлоты в глобальном масштабе, показано, что в период с 2007 до 2016 года температура грунтов на подошве деятельного слоя (нулевая амплитуда колебания температуры) увеличилась в зоне сплошной мерзлоты на $0,39 \pm 0,15$ °С. За тот же период не сплошная мерзлота (discontinuous permafrost) нагрелась на $0,20 \pm 0,10$ °С, а температура горной мерзлоты увеличилась на $0,19 \pm 0,05$ °С. В глобальном масштабе температура мерзлоты на подошве деятельного слоя увеличилась на $0,29 \pm 0,12$ °С.

Повышение температуры приводит к деградации вечномерзлых грунтов, что обуславливает развитие опасных геокриологических процессов, таких как термокарст, термоэрозия, термоабразия, солифлюкция, морозное пучение и других процессов. Оттаивание мерзлых грунтов приводит к снижению несущей способности оснований зданий и сооружений их деформированию и разрушению [5, 15, 16, 18, 20, 21]. Особую опасность для инфраструктуры представляют процессы береговой эрозии речных и морских берегов, сложенных ледовым комплексом (рис. 2).



Рис. 2. Деградация мерзлоты – основной фактор дестабилизации социально-экономического развития криолитозоны РФ [42]

Fig. 2. Permafrost degradation is the main factor of destabilization of the socio-economic development of the cryolithozone of the Russian Federation [42]

Строительная нормативная база (СП 25.13330, СП 305.13330, СП498.13330 и др.) регламентирует нормы и правила выполнения геотехнического мониторинга на стадии строительства и эксплуатации. Несмотря на достаточно детальную проработку требований к мониторингу в нормах, следует отметить низкое качество выполнения геотехнического мониторинга, несоблюдение периодичности и точности измерения, неверное расположение контролируемых параметров и др. Зачастую мониторинг полностью не выполняется, особенно в жилых и гражданских зданиях. Получаемые данные не анализируются, проводится прогноз изменений контролируемых параметров с учетом результатов мониторинга.

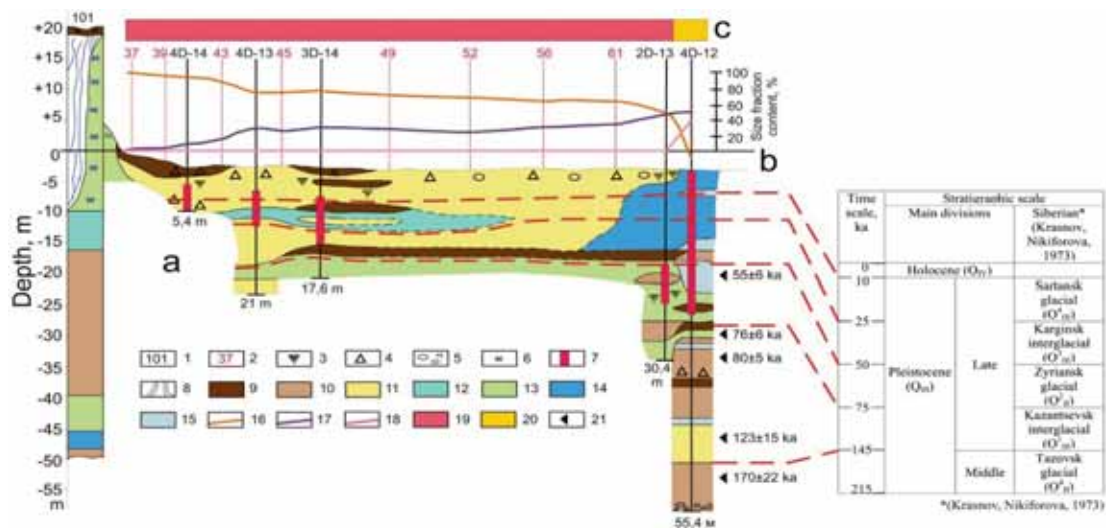


Рис. 3. Дegradaция подводной мерзлоты прогрессирует со скоростью до 18 см в год – во много раз выше, чем было принято считать [24]

Fig. 3. The degradation of permafrost is progressing at a rate of up to 18 cm per year, many times higher than previously though [24]

Мониторинг геотехнической и экологической обстановки в акватории Северного морского пути не нормируется и практически не проводится. Наблюдения за геокриологической обстановкой акватории проводится фрагментарно и в большинстве случаев базируется на энтузиазме ученых и разовых грантах [24, 25]. Необходимость в периодических исследованиях в режиме фоновом мониторинга можно проиллюстрировать рис. 3, из рассмотрения которого следует, что скорости реальной вертикальной деградации подводной мерзлоты во много раз выше тех, что теоретически предсказаны на основе математического моделирования. Более того, было задокументировано увеличение скорости вертикальной деградации подводной мерзлоты в два раза за последние 30 лет [10, 24, 36]. Важнейшей характерной особенностью подводной мерзлоты акватории Северного морского пути стало обнаружение близости к фазовому переходу [10, 24], что можно проиллюстрировать данными научного бурения (рис. 4).

Не выполняется мониторинг опасных геокриологических процессов и прогнозы изменения мерзлотных условий, также не выполняется составление геокриологических карт. Тем не менее многолетние экспедиционные комплексные исследования состояния подводной мерзлоты на арктическом шельфе РФ показали, что одним из наиболее перспек-

тивных методов картирования кровли подводной мерзлоты является электромагнитное профилирование, реализованное в различных летних и зимних модификациях с буксировкой излучающих и принимающих антенн или в стационарном режиме в море или на льду с раскладыванием петель на неровных поверхностях, например, на припайном льду или в районах ледовых комплексов и аласов [26, 27].

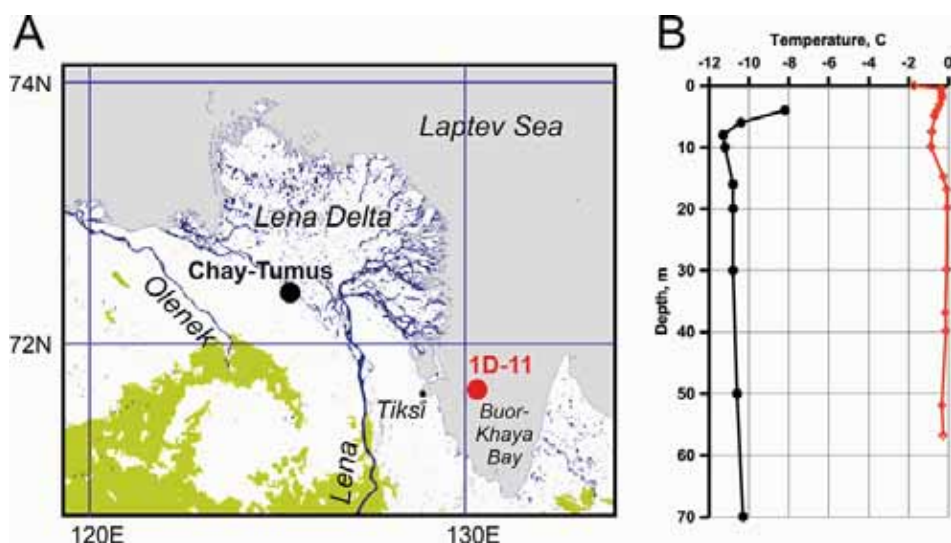


Рис. 4. Подводная мерзлота примерно на 10 °С теплее наземной мерзлоты и характеризуется наличием глубоких или сквозных таликов – путей разгрузки глубинного метана [10]

Fig. 4. The underwater permafrost is about 10 °C warmer than the ground permafrost and is characterized by the presence of deep or through taliks – ways of unloading deep methane [10]

Создание системы мониторинга

Глобальное потепление климата приводит к изменению температурного режима вечномёрзлых грунтов, имеющих в своем составе лед, газогидраты, флюиды, органические вещества, соли и микроорганизмы. Оценка и количественный прогноз изменения данных компонент является важной хозяйственной задачей.

Изменения, происходящие в криолитозоне при антропогенном и природном воздействиях приводят к развитию негативных для вечной мерзлоты и инженерных сооружений процессов. Оценка, наблюдения, прогноз и контроль данных явлений должны осуществляться с помощью геоэкологического и экологического мониторингов. Учитывая значимость, широту и межотраслевую кооперацию, мониторинг должен иметь государственное управление.

Государственный мониторинг вечной мерзлоты – межведомственная система наблюдений и сбора данных, анализ изменения и прогноз состояния контролируемых параметров вечной мерзлоты в природных условиях (фоновый мониторинг) и инженерных зданий и сооружений (геотехнический мониторинг).

Целью геотехнического мониторинга криолитозоны является:

- оценка, контроль и прогноз теплового состояния вечномёрзлых грунтов;
- оценка несущей способности и деформационного состояния фундаментов инженерных сооружений;

- обеспечение промышленной и экологической безопасности объектов промышленного, гражданского и жилищного строительства, транспортных систем на территории арктической криолитозоны страны, включая мелководную зону шельфа северных морей;
- предотвращение и ликвидация медико-биологических угроз в Арктике;
- предотвращение аварийных ситуаций, связанных с пузырьковыми выбросами метана газогидратов, включая геофизический мониторинг, уже обнаруженных подводных бугров пучения и образования взрывных кратеров с линейными размерами до 200 метров и более [10];
- информационное обеспечение государственных структур, органов местного самоуправления и граждан информацией о состоянии вечной мерзлоты в Арктической зоне РФ.

Основные задачи мониторинга криолитозоны:

- замеры величин контролируемых параметров, наблюдения, сбор, обработка и анализ данных о состоянии криолитозоны;
- оценка состояния температурно-влажностного режима криолитозоны и прогнозирование его изменений;
- своевременное выявление и прогнозирование развития природных и техногенных процессов, влияющих на состояние криолитозоны;
- разработка эффективных мероприятий по предотвращению или снижению негативного воздействия опасных геокриологических процессов на осваиваемой площадке;
- своевременное информирование органов власти, организаций, субъектов хозяйственной деятельности и граждан об изменениях состояния криолитозоны;
- межведомственное взаимодействие и международное сотрудничество в сфере обмена информацией по экологически безопасному природопользованию в Арктике.

Геотехнический мониторинг

В районах распространения многолетнемерзлых грунтов мониторинг должен проводиться для всех видов зданий и сооружений, в том числе подземных инженерных коммуникаций, согласно СП 25.13330 [5]. Мониторинг на стадии строительства и дальнейшей эксплуатации сооружений выполняется на основании программы мониторинга, который является обязательной частью проектной документации на стадии проекта. Для осуществления мониторинга в период строительства сооружений оборудуются контрольные термометрические и гидрогеологические скважины, на фундаментах сооружений устанавливаются постоянные геодезические марки, по которым выполняются измерения температуры грунта, уровень подземных вод, их состав и температура, замеры деформаций фундаментов. Дополнительно могут контролироваться: температура воздуха в проветриваемом подполье, работоспособность искусственной вентиляции, сезонно или искусственно охлаждающих устройств, высота и плотность снежного покрова, влажность и плотность грунтов, уложенных в насыпях, при замене грунтов в выемках и при намыве территории. Устройство системы мониторинга выполняется в соответствии с проектом, выполняемым на стадии подготовки рабочей документации.

В состав геотехнического мониторинга (ГТМ) входят следующие виды работ:

- текущий и контрольный осмотр состояния технических этажей, подполий зданий и расположенных в них коммуникаций и других устройств;
- наблюдения за состоянием бетона фундаментов;

- наблюдения за температурой грунта в основании сооружений;
- наблюдения за температурой воздуха в подполье;
- наблюдения за работой системы искусственной вентиляции подполья;
- наблюдения за работой охлаждающих устройств;
- наблюдения за осадками фундаментов;
- наблюдения за гидрогеологическим режимом грунтового основания.

В состав наблюдаемых параметров дополнительно включают характеристики снежного и почвенного покровов, обводнение поверхности, влажность почв и грунтов, от которых зависит температурный режим грунтов.

Мониторинг для сооружений, построенных по I принципу, должен проводиться в течение всего периода эксплуатации сооружения. Важно подчеркнуть, что для прогноза состояния вечной мерзлоты требуются наблюдения ряда параметров, а не только температуры, уровня грунтовых вод и деформаций строительных конструкций. Кроме того, необходима оценка факторов, влияющих на температурный режим грунтов оснований зданий и сооружений, которые могут быть природными (глобальное потепление, изменения атмосферных осадков, гидрология поверхностных и межмерзлотных вод, эволюция растительного покрова) и техногенными (утечки вод из коммуникаций, изменение рельефа или прямое тепловое воздействие на грунтовое основание). Также важны наблюдения за динамикой изменения глубины сезонно-талого слоя и таликов мерзлоты в районах интенсивного строительства.

В зависимости от особенностей объекта, расположенного в криолитозоне, необходимо определить наблюдаемые параметры, в том числе параметры криогенных процессов, для защиты объекта от разрушения. Поэтому для прогноза устойчивости инфраструктуры необходимо не только ГТМ, но и фоновый мониторинг, где можно отслеживать естественные колебания природных параметров и учитывать их при прогнозе несущей способности оснований.

В процессе строительства наблюдательных скважин для фонового и геотехнического мониторингов следует выполнять инженерно-геологические изыскания мерзлых пород: физические свойства; состав, льдистость (влажность), плотность, механические свойства; теплофизические характеристики (теплопроводность, теплоемкость) и т. д. Наблюдательные скважины могут оборудоваться автономными автоматизированными средствами для регистрации и накопления температурных данных, обеспечивающих точность измерения не ниже 0,1 °С во всем диапазоне изменения температуры мерзлых и талых грунтов. В избранных районах развития инфраструктуры целесообразно организовывать электротомографические профили, которые позволяют отслеживать глубину сезонно-талого слоя и таликов различного генезиса в реальном масштабе времени. Для проведения высокоточного мониторинга вертикального и горизонтального движений поверхности (с точностью 1–2 мм в год) предлагается создать сеть станций геодезического спутникового мониторинга.

Выполнение в Арктике и Субарктике единых по методическому подходу геокриологических и геотехнических наблюдений в рамках фонового и геотехнического мониторингов позволит обоснованно подойти к прогнозированию температурного режима грунтов основания и прогнозированию развития опасных геологических процессов на территориях застройки промышленного и гражданского назначений.

Единый методический подход (включая технические средства наблюдений, создание объединенных баз и банков данных) в изучении и мониторинге состояния вечной мерзлоты

ты в естественных условиях и на застроенной территории существенным образом повысит эффективность исследований и проектных решений, выполняемых в настоящее время раздельно научно-исследовательскими организациями и хозяйствующими субъектами.

Фоновый мониторинг экологических и климатических последствий деградации наземной и подводной мерзлоты

В последнее время основные исследования были направлены на решение фундаментальных задач: оценку углеродного потенциала наземной мерзлоты, который оценивается в:

1. ~1400 ГтС (1 Гт = 1 млрд тонн) в верхнем слое наземной мерзлоты (толщиной примерно 3 метра), который может деградировать в течение ближайших десятилетий вследствие летнего оттаивания;

2. ~ 400 ГтС в береговом ледовом комплексе, который подвержен в летний период разрушению (эрозии) вследствие термокарста и волноприбойной деятельности [11, 30].

На примере Северо-Восточной Азии было показано, что в региональном балансе атмосферного CO_2 основную роль может играть дисбаланс между респирацией и фотосинтезом северных почв [28], при растущем вкладе окисления эрозионного углерода на арктическом шельфе, что приводит к экстремальной асидификации (подкислению) вод и угнетению бентосных организмов – основной кормовой базой моржей, на которых охотятся белые медведи, что особенно актуально для восточной части Восточно-Сибирского моря, примыкающей к острову Врангеля («родному белых медведей» в Восточной Арктике) [31, 33].

Рост атмосферной эмиссии CO_2 , вследствие *медленного* процесса углубления сезонно-талого слоя наземной мерзлоты, может привести к ускорению удвоения содержания атмосферного CO_2 в ближайшие десятилетия [34]. Для оценки динамики этого процесса целесообразно провести сравнительные исследования на характерных трансектах, пересекающих все типичные ландшафты в ключевых районах Сибири, где представлены различные виды мерзлоты – от сплошной до островной и спорадической. Особое внимание следует уделить исследованию и количественной оценке транспорта и трансформации наземного органического вещества (ОВ) в арктической системе «суша–шельф», с фокусом на вынос ОВ в различных формах со стоком великих Сибирских рек и в результате береговой эрозии [31, 42].

Предполагается, что в результате современного беспрецедентного потепления должны произойти изменения в состоянии наземной мерзлоты, которые приведут к мобилизации и экспорту в море огромного количества наземного ОВ, которое в значительной степени может трансформироваться в CO_2 и в значительной мере повлиять на экологическое состояние вод на акватории Северного морского пути [31, 32]. Более того, увеличивается экспорт токсичных и нетоксичных металлов, ассоциированных с мобилизацией ОВ из деградирующей мерзлоты, что может оказать существенное влияние на состояние здоровья коренных народов через трофические цепочки от фитопланктона к рыбе – основной пище местного населения.

Известно, что шельф морей Восточной Арктики (МВА) подстилается подводной мерзлотой, в которой законсервирован огромный пул метана (1750 ГтС), из которых 500 ГтС – в форме природного газа, а 750 ГтС – в форме газгидратов [11, 42]. В условиях, когда температурный режим мерзлоты не нарушен, метан сохраняется в законсервированном резервуаре и не попадает в водную толщу и далее в атмосферу. В теплые климатические

эпохи температурный режим мерзлоты меняется, что приводит к частичной дестабилизации метанового резервуара и его эмиссии в водную толщу. Поскольку метан поступает из донных отложений в водную толщу МВА в виде восходящих струй и «облаков» пузырей, в форме так называемых *факелов* или *сипов*, он преодолевает окислительный потенциал донных осадков шельфа и выбрасывается в атмосферу. Скорость деградации мерзлоты растет, а вместе с ней растет и эмиссия метана в атмосферу Арктического региона. Учитывая, что в современной атмосфере планеты содержится примерно 5 Гт метана, то становится очевидным, что выброс даже ничтожно малой доли метана (менее 1 %), законсервированного в мерзлоте МВА, способен увеличить концентрацию метана в атмосфере планеты многократно, что может привести к значительному потеплению в глобальном масштабе. Учитывая также, что радиационная эффективность метана для 20-летнего периода (GWP20) в 80 раз выше, чем двуокиси углерода, то можно предположить, что вклад этой эмиссии может значительно превысить антропогенный вклад в эмиссию парниковых газов.

Ускорение деградации подводной мерзлоты было установлено на основе повторного научного бурения на шельфе скважин 30-летней давности [24], а также был задокументирован драматический рост потока метана в результате многократного увеличения сечения мега-сипов, выявленного в результате 25-летнего мониторинга акватории Северного морского пути (рис. 5). Отметим, что, начиная с 2012 года, во всех авторских экспедициях используется новая технология количественной оценки пузырькового переноса [36, 39].

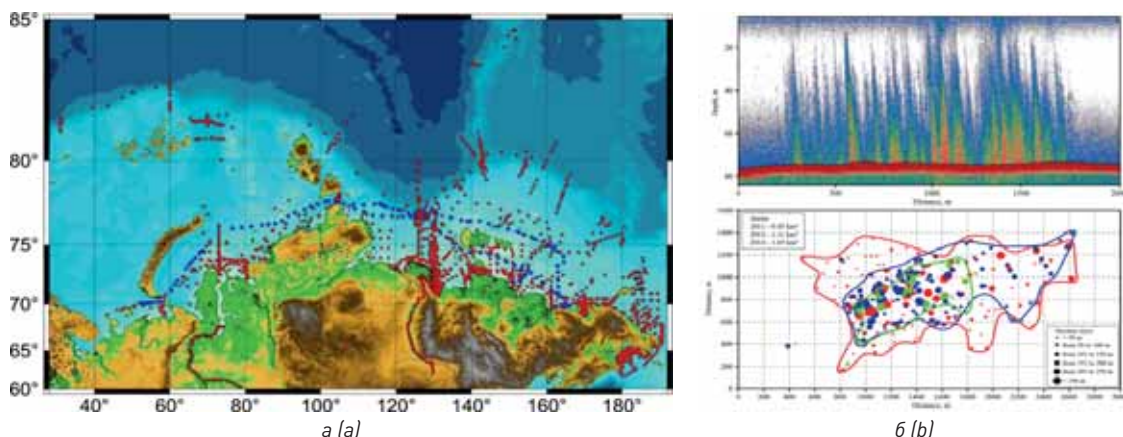


Рис. 5. а – Блок-схема комплексных морских исследований, выполненных в арктических морях России в 1999–2024 гг. под руководством И.П. Семилетова. Синим цветом показана экспедиция 2024 г.; б – пример драматического роста размеров источника массивного выброса пузырькового метана

Fig. 5. a – is a flowchart of comprehensive marine research carried out in the Arctic seas of Russia in 1999–2024 under the leadership of I.P. Semiletov. The expedition of 2024 is shown in blue; b – is an example of a dramatic increase in the size of the source of a massive release of bubbly methane

Развитие фонового мониторинга подводной мерзлоты целесообразно основывать на многолетних инициативных исследованиях, представленных в ряде ключевых публикаций [10, 23, 24, 26, 36, 42] и на рис. 5. Такой подход позволит выполнить картирование кровли подводной мерзлоты и оценку вероятности проявления георисков, связанных с деградацией подводной мерзлоты и дестабилизацией гидратов в районах выполнения промышленной разведки и бурения скважин, а также прокладки подводных нефтегазопроводов. Кроме того, на основе комплекса геофизических, биогео-

химических и геологических исследований (включая выявление роли современных сейсмотектонических процессов) будут выработаны практические рекомендации по минимизации ущерба от потенциальных георисков при освоении прибрежной зоны и акватории Северного морского пути.

Конкретная реализация мероприятий по мониторингу мерзлоты

В настоящее время становится очевидным, что фоновый (природный) мониторинг состояния мерзлоты в арктической системе «суша-шельф» является неотъемлемой частью геотехнического мониторинга. Поэтому стратегия полномасштабного социально-экономического развития в Арктическом секторе РФ должна быть основана на единой комплексной научно-технологической платформе, сформированной в структуре Минстроя, с учетом многолетнего опыта ведущих ученых и инженеров, которые доказали высокую эффективность комплексного мониторинга состояния и структуры мерзлоты, включая передовые методы исследований, разработанные в профильных научно-исследовательских институтах, университетах и ряде институтов РАН. Ниже приведен *план начала фонового мониторинга наземной и подводной мерзлоты* с фокусом на прибрежной зоне и ключевых районах акватории Северного морского пути, который основан на уже разработанных и испытанных в натурных условиях технологиях мирового уровня. Реализация указанных направлений мониторинга будет начата незамедлительно – *в дополнение к уже существующим разрезам и полигонам*, после начала финансирования важнейшего национального проекта, направленного на устойчивое социально-экономическое развитие более 2/3 территории Российской Федерации, в которых присутствуют вечномерзлые грунты, имеющие различную геологическую историю, что проявляется в изменении типов мерзлоты от сплошной до островной и спорадической.

Мониторинг в ключевых районах наземной мерзлоты, включая прибрежную Арктическую зону РФ:

- дистанционный мониторинг глубины залегания сезонно-талого слоя методом электротомографии с тестированием прямыми измерениями (бурение, металлический прут) и откалиброванными СВЧ-радарам;
- 3D-картирование современных и динамических границ существующих термокарстовых таликов природного (озерные, подрусьевые, сейсмотектонические и иной природы) и техногенного характеров различными модификациями метода электромагнитного зондирования с валидацией по данным бурения;
- массивированный термический мониторинг сезонно-талого слоя и селективный мониторинг деятельного слоя в характерных мерзлотных ландшафтах с передачей и сбором данных в центрах координации и управления проектом.

Мониторинг в ключевых районах подводной мерзлоты в прибрежной зоне и на акватории Северного морского пути:

- картирование кровли подводной мерзлоты различными модификациями метода электромагнитного зондирования с тестированием по данным бурения;
- акустический количественный мониторинг потоков пузырькового метана в зонах массивированной разгрузки – в комплексе с мониторингом границ зон разгрузки метана с помощью эхолотных комплексов;
- 3D-картирование современных и динамических границ подводных термокарстовых таликов природного (озерные, подрусьевые, сейсмотектонические) и иной приро-

ды различными модификациями метода электромагнитного зондирования в комплексе с сейсмическим профилированием на различных частотах, с валидацией по данным бурения;

- мониторинг сейсмотектонической активности в ключевых районах арктического шельфа и материкового склона с помощью постановки донных станций и анализа существующих и расширенных сетей наземного/прибрежного геофизического мониторинга;

- 3D-мониторинг изменения подводных ландшафтов с помощью геоакустических комплексов и с фокусом на формирование и развитие положительных форм рельефа (бугры пучения различного генезиса), которые являются предвестниками взрывообразного образования отрицательных форм рельефа дна (покмарки, кратеры);

- мониторинг изотопных (С-13, дейтерий, С-14, изотопы благородных газов) и прочих индикаторов (молекулярный состав гопанов, элементный и изотопный состав аутигенных карбонатов и т.д.) генезиса массивированных разгрузок газообразного и жидкого геофлюида из донных осадков в водную толщу и атмосферу.

Комплексный мониторинг будет дополнен экспериментальными лабораторными высокотехнологичными исследованиями влияния солей на состояние мерзлоты и стабильность газовых гидратов [40, 41]. Данные мониторинга будут использованы для кросс-валидации диагностических моделей динамики состояния мерзлоты, которые были протестированы данными бурения [24, 37], которые станут основой для нового поколения прогностических моделей состояния мерзлоты, что станет основой для безопасного планирования развития инфраструктуры в северных районах РФ на ближайшее будущее – на десятки и сотни лет.

Выводы

Современные изменения климата приводят к повышению температурного режима криолитозоны, в том числе в акватории Северного морского пути, вызывая деформирование инженерных сооружений и нарушая природное сложение вечномерзлых грунтов.

Контроль за состоянием вечной мерзлоты и обеспечением ее сохранности должен осуществляться с помощью государственного мониторинга, состоящего из фоновых (природного) и геотехнического (объектного) мониторингов.

Основным способом обеспечения сохранения вечномерзлых грунтов в основании зданий и сооружений является геотехнический мониторинг, обеспечивающий наблюдения, анализ и прогноз температурного и гидрогеологического режимов основания, деформационного состояния сооружения. Он позволяет выявить характерные динамические особенности деградации различных типов мерзлоты в различных типах ландшафтов, которые станут основой для репрезентативного прогнозирования состояния мерзлых грунтов, что является основой для проектирования инфраструктуры для дальнейшего освоения природных ресурсов в российском секторе Арктики.

Последствия геоэкологических катастроф, которые могут произойти при создании инфраструктуры Северного морского пути (включая проектирование и строение портовых сооружений, мобильных плавучих АЭС, подводных трубопроводов и т. д.), разведочно-промышленной деятельности, выполненной без учета последних достижений наших научных исследований, в материальном отношении могут нанести ущерб, значение которого трудно переоценить.

Список литературы

1. Vasiliev A.V., Drozdov A.G. Gravis et al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environmental Research Letters*, 2020; 15(4). pp. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12 EDN: ESYZUG
2. Мельников В.П., Осипов В.И., Брушков А.В. и др. Адаптация инфраструктуры Арктики и Субарктики к изменениям температуры мерзлых грунтов // *Криосфера Земли*. 2021; XXV (6):3–15. DOI: 10.15372/KZ20210601 EDN: HEVLIU
3. Заключение РАН: Проект Федерального закона «О внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации в части создания государственной системы мониторинга многолетнемерзлых грунтов» / Вице-президент РАН В.Н. Пармон [23.07.2021]. Новосибирск: СО РАН, 2021.
4. Павлов А.В. Мониторинг криолитозоны. Новосибирск: Гео, 2008.
5. Алексеев А.Г. Геотехнический мониторинг на многолетнемерзлых грунтах. Москва: АСВ, 2019. 111 с. ISBN: 978-5-4323-0331-8 EDN: WVDBNX
6. Брушков А.В., Алексеев А.Г., Дроздов Д.С. и др. Мониторинг вечной мерзлоты. Москва: Академический проект, 2024. 468 с. ISBN: 978-5-8291-4278-0 EDN: YAWPIQ
7. Мельников В.П., Брушков А.В., Федоров Р.Ю. К развитию холистического образа криосферы // *Арктика: экология и экономика*. 2021;11(4):519–528. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-519-528 EDN: JSCDWF
8. Гинсбург Г.Д., Соловьев В.А. Субмаринные газовые гидраты. Санкт-Петербург: ВНИИОкеангеология, 1994. 194 с.
9. Makagon Y.F., Holditch S.A., Makagon T.Y. Natural gas hydrates – a potential energy source for the 21st century. *J. Petr. Sci. Eng.*, 2007; 56:14–31. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.10.009>
10. Шахова Н.Е., Сергиенко В.И., Семилетов И.П. Вклад Восточно-Сибирского шельфа в современный цикл метана // *Вестник РАН*. 2009;79(6):507–518. EDN: KMLVQJ
11. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *Journal Geophys. Res.*, 2010a, 115, DOI: 10.1029/2009JC005602 EDN: TIIZAX
12. ACIA, 2004. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press.
13. Васильев А.А., Гравис А.Г., Губарьков А.А., и др. Деградация мерзлоты: результаты многолетнего геоэкологического мониторинга в западном секторе российской Арктики // *Криосфера Земли*. 2020; XXIV (2):15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30) EDN: HROYGC
14. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetz L.J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019; 10(1):264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4 EDN: HTZKKV
15. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V., et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 2022; (112):231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6 EDN: ZPYQET
16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019; 14(2):025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6 EDN: AHATIK
17. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, 2019; (42):267–286. DOI: 10.1080/1088937X.2019.1686082 EDN: PXPBBS
18. Badina S., Pankratov A. Assessment of the impacts of climate change on the Russian Arctic economy (including the energy industry). *Energies*, 2022; 15(8). DOI: 10.3390/en15082849 EDN: NNRCTK
19. United Nation. Goals. 9. Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization and foster innovation. URL: <https://sdgs.un.org/goals/goal9>.
20. Медведков А.А. Геоэкологические факторы жизнестойкости арктических городов в криолитозоне: теоретические подходы к изучению // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2021;85(5):726–739. DOI: 10.31857/S2587556621050071 EDN: OGQMWR
21. Хрусталева Л.Н. Температурный режим вечномёрзлых грунтов на застроенной территории. Москва: Наука, 1971. 167 с.
22. Semiletov I., Shakhova N., Romanovsky V. Methane Climate Forcing and Methane Observations in the Siberian Arctic Land-Shelf System. *World Resource Review*, 2004; 16(4):503–541.

23. Шахова Н.Е., Никольский Д.Ю., Семилетов И.П. О современном состоянии подводной мерзлоты на Восточно-Сибирском шельфе: тестирование результатов моделирования данными натурных измерений. *Доклады Академии наук*. 2009; 429(6):541–544. EDN: KYGOCN
24. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017; (8):15872. DOI: 10.1038/ncomms15872 EDN: XNDEBA
25. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014; 7(1):64–70, 2014. DOI: 10.1038/ngeo2007 EDN: SKLLGN
26. Koshurnikov A.V., Tumskey V.E., Shakhov N.E., et al. The first ever application of electromagnetic sounding for mapping the submarine permafrost table on the Laptev Sea. *Dokl. Earth Sci*, 2016; 469:860–863. DOI: 10.1134/S1028334X16080110 EDN: XFIKAN
27. Alekseev D.A., Koshurnikov A.V., Gunar A., et al. Time-Domain Electromagnetics for Subsea Permafrost Mapping in the Arctic: The Synthetic Response Analyses and Uncertainty Estimates from Numerical Modelling Data. *Geosciences*, 2023; 13:144. DOI: 10.3390/geosciences13050144 EDN: FCPMCS
28. Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviodov S.P., et al. Wintertime CO₂ Emission from Soils of Northeastern Siberia. *Arctic*, 1993; 46(3):197–204. DOI: 10.14430/arctic1344 EDN: VUTHXT
29. Semiletov I.P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters, *Trans. Doklady Russian Acad. Sci*, 1999; 368:679–682. EDN: MQDSJL
30. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., et al. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System. *Environment Research Letters*, 2012; (7). DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015201 EDN: ARLKHH
31. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., et al., Extreme acidification in the East Siberian Arctic Shelf driven by a permafrost-released carbon translocation and seawater freshening. *Nature Geoscience*, 2016; 9:361–365. DOI: 10.1038/NGEO2695 EDN: UOXOKP
32. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion. *Biogeosciences*, 2011; 8(9):2407–2426. DOI: 10.5194/bg-8-2407-2011 EDN: JVIOMM
33. Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I.A., Shakhova N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic. *Journal of Marine Systems*, 2007; 66(1–4):204–226. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2006.05.012 EDN: LKMQTB
34. Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., MacDonald E. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021; 118(21). DOI: 10.1073/pnas.2100163118 EDN: FEMEWR
35. Соловьев В.А. Прогноз распространения реликтовой субаквальной мерзлой зоны (на примере восточно-арктических морей). Криолитозона арктического шельфа. Изд-во Института мерзлотоведения СО АН СССР. Якутск, 1981. С. 28–38.
36. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015; 373:20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451 EDN: UZYQRR
37. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Methane Hydrate Feedbacks, In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol, eds., Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Programme August, 2009; 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1
38. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., et al. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010; 327(5970):1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221 EDN: MXGVPH
39. Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., et al. Sonar Estimation of Methane Bubble Flux from Thawing Subsea Permafrost: A Case Study from the Laptev Sea Shelf. *Geosciences*, 2020; 10(10):411. DOI: 10.3390/geosciences10100411 EDN: SQLOLB
40. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin, S., Shakhova N., Semiletov I. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling. *Geosciences*, 2019; 9:188. DOI: 10.3390/geosciences9040188 EDN: EEEMKL
41. Yusupov V., Semiletov I. Understanding the processes associated with the formation and decomposition of gas hydrates on the Arctic shelf. *Fuel*, 2025; 388:134472. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134472 EDN: TMWDYY
42. Семилетов И.П., Шахова Н.Е. Баланс парниковых газов и изменение климата: роль деградации мерзлоты в Арктике // *Вестник Дальневосточного отделения Российской академии наук*. 2024. № 4. С. 5–43. DOI: 10.31857/S0869769824040015

References

1. Vasiliev A.V., Drozdov A.G. Gravis et al. Permafrost degradation in the Western Russian Arctic. *Environmental Research Letters*, 2020; 15(4). pp. DOI: 10.1088/1748-9326/ab6f12 EDN: ESYZUG
2. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V. et al. Adaptation of Arctic and Subarctic infrastructure to changes in permafrost soil temperature. *Earth's Cryosphere*, 2021; XXV (6):3–15. DOI: 10.15372/KZ20210601 EDN: HEVLIU
3. Conclusion of the RAS: Draft Federal Law "On Amendments to Certain Legislative Acts of the Russian Federation Regarding the Creation of a State System for Monitoring Permafrost Soils" / Vice-President of the RAS V.N. Parmon (23.07.2021). Novosibirsk: SB RAS, 2021.
4. Pavlov A.V. Monitoring of the Cryolithozone. Novosibirsk: Geo, 2008.
5. Alekseev A.G. Geotechnical Monitoring of Permafrost Soils. Moscow: ASV, 2019. 111 p. ISBN: 978-5-4323-0331-8 EDN: VVDBNX
6. Brushkov A.V., Alekseev A.G., Drozdov D.S., et al. Permafrost Monitoring. Moscow: Academicheskyy Proekt, 2024. 468 p. ISBN: 978-5-8291-4278-0 EDN: YAWPIQ
7. Melnikov V.P., Brushkov A.V., Fedorov R.Yu. Toward a Holistic Image of the Cryosphere. *Arctic: Ecology and Economy*, 2021; 11(4):519–528. DOI: 10.25283/2223-4594-2021-4-519-528 EDN: JSCDWF
8. Ginsburg G.D., Soloviev V.A. Submarine Gas Hydrates. St. Petersburg: VNIIOkeangeologiya, 1994. 194 p.
9. Makagon Y.F., Holditch S.A., Makagon T.Y. Natural Gas Hydrates – a Potential Energy Source for the 21st Century. *J. Petr. Sci. Eng.*, 2007; 56:14–31. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2005.10.009>
10. Shakhova N.E., Sergienko V.I., Semiletov I.P. Contribution of the East Siberian Shelf to the Modern Methane Cycle. *Vestnik RAS*, 2009; 79(6):507–518. EDN: KMLVQJ
11. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Geochemical and geophysical evidence of methane release from the inner East Siberian Shelf. *Journal Geophys. Res*, 2010a, 115, DOI: 10.1029/2009JC005602 EDN: TIIZAX
12. ACIA, 2004. Impacts of a Warming Arctic: Arctic Climate Impact Assessment. ACIA Overview report. Cambridge University Press.
13. Vasiliev A.A., Gravis A.G., Gubarkov A.A., et al. Permafrost degradation: results of long-term geocryological monitoring in the western sector of the Russian Arctic. *Earth's Cryosphere*, 2020; XXIV (2):15–30. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2020-2(15-30) EDN: HROYGC
14. Biskaborn B.K., Smith S.L., Noetz L.J. et al. Permafrost is warming at a global scale. *Nature Communications*, 2019; 10(1):264. DOI: 10.1038/s41467-018-08240-4 EDN: HTZKKV
15. Melnikov V.P., Osipov V.I., Brushkov A.V., et al. Climate warming and permafrost thaw in the Russian Arctic: potential economic impacts on public infrastructure by 2050. *Natural Hazards*, 2022; (112):231–251. DOI: 10.1007/s11069-021-05179-6 EDN: ZPYQET
16. Streletskiy D.A., Suter L., Shiklomanov N.I., et al. Assessment of climate change impacts on buildings, structures and infrastructure in the Russian regions on permafrost. *Environmental Research Letters*, 2019; 14(2):025003. DOI: 10.1088/1748-9326/aaf5e6 EDN: AHATIK
17. Suter L., Streletskiy D., Shiklomanov N. Assessment of the cost of climate change impacts on critical infrastructure in the circumpolar Arctic. *Polar Geography*, 2019; (42):267–286. DOI: 10.1080/1088937X.2019.1686082 EDN: PXPBBS
18. Badina S., Pankratov A. Assessment of the impacts of climate change on the Russian Arctic economy (including the energy industry). *Energies*, 2022; 15(8). DOI: 10.3390/en15082849 EDN: NNRCTK
19. United Nation. Goals. 9. Build resilient infrastructure, promote inclusive and sustainable industrialization, and foster innovation. URL: <https://sdgs.un.org/goals/goal9>.
20. Medvedkov A.A. Geoeological factors of the resilience of Arctic cities in the permafrost zone: theoretical approaches to study. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences. Geographical Series*, 2021; 85(5):726–739. DOI: 10.31857/S2587556621050071 EDN: OGQMWR
21. Khrustalev L.N. Temperature regime of permafrost soils in built-up areas. Moscow: Nauka, 1971. 167 p.
22. Semiletov I., Shakhova N., Romanovsky V. Methane Climate Forcing and Methane Observations in the Siberian Arctic Land-Shelf System. *World Resource Review*, 2004; 16(4):503–541.
23. Shakhova N.E., Nikol'skii D.Yu., Semiletov I.P. On the current state of subsea permafrost on the East Siberian shelf: testing modeling results with in-situ measurement data. *Doklady Akademii Nauk*, 2009; 429(6):541–544. EDN: KYGOCN

24. Shakhova N., Semiletov I., Gustafsson O., et al. Current rates and mechanisms of subsea permafrost degradation in the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Communications*, 2017; (8):15872. DOI: 10.1038/ncomms15872 EDN: XNDEBA
25. Shakhova N., Semiletov I., Leifer I., et al. Ebullition and storm-induced methane release from the East Siberian Arctic Shelf. *Nature Geoscience*, 2014; 7(1):64–70, 2014. DOI: 10.1038/geo2007 EDN: SKLLGN
26. Koshurnikov A.V., Tumskoy V.E., Shakhov, N.E., et al. The first ever application of electromagnetic sounding for mapping the submarine permafrost table on the Laptev Sea. *Dokl. Earth Sci*, 2016; 469:860–863. DOI: 10.1134/S1028334X16080110 EDN: XFIKAN
27. Alekseev D.A., Koshurnikov A.V., Gunar A., et al. Time-Domain Electromagnetics for Subsea Permafrost Mapping in the Arctic: The Synthetic Response Analyzes and Uncertainty Estimates from Numerical Modeling Data. *Geosciences*, 2023; 13:144. DOI: 10.3390/geosciences13050144 EDN: FCPMCS
28. Zimov S.A., Semiletov I.P., Daviodov S.P., et al. Wintertime CO₂ Emission from Soils of Northeastern Siberia. *Arctic*, 1993; 46(3):197–204. DOI: 10.14430/arctic1344 EDN: VUTHXT
29. Semiletov I.P. Destruction of the coastal permafrost ground as an important factor in biogeochemistry of the Arctic Shelf waters, Trans. *Doklady Russian Acad. Sci*, 1999; 368:679–682. EDN: MQDSJL
30. Semiletov I.P., Shakhova N.E., Sergienko V.I., et al. On Carbon Transport and Fate in the East Siberian Arctic Land-Shelf-Atmosphere System. *Environment Research Letters*, 2012; (7). DOI: 10.1088/1748-9326/7/1/015201 EDN: ARLKHH
31. Semiletov I., Pipko I., Gustafsson Ö., et al., Extreme acidification in the East Siberian Arctic Shelf driven by a permafrost-released carbon translocation and seawater freshening. *Nature Geoscience*, 2016; 9:361–365. DOI: 10.1038/NGE02695 EDN: UOXOKP
32. Semiletov I.P., Pipko I.I., Shakhova N.E., et al. Carbon transport by the Lena River from its headwaters to the Arctic Ocean, with emphasis on fluvial input of terrestrial particulate organic carbon vs. carbon transport by coastal erosion. *Biogeosciences*, 2011; 8(9):2407–2426. DOI: 10.5194/bg-8-2407-2011 EDN: JVIOMM
33. Semiletov I.P., Pipko I.I., Repina I.A., Shakhova N. Carbonate dynamics and carbon dioxide fluxes across the atmosphere-ice-water interfaces in the Arctic Ocean Pacific sector of the Arctic. *Journal of Marine Systems*, 2007; 66(1-4):204–226. DOI: 10.1016/j.jmarsys.2006.05.012 EDN: LKMQTB
34. Natali S.M., Holdren J.P., Rogers B.M., MacDonald E. Permafrost carbon feedbacks threaten global climate goals. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2021; 118(21). DOI: 10.1073/pnas.2100163118 EDN: FEMEWR
35. Soloviev V.A. Forecast of the distribution of the relic subaqueous permafrost zone (using the East Arctic seas as an example). Cryolithozone of the Arctic shelf. Publishing House of the Permafrost Institute of the Siberian Branch of the USSR Academy of Sciences. Yakutsk, 1981, pp. 28–38.
36. Shakhova N., Semiletov I., Sergienko V., et al. The East Siberian Arctic Shelf: towards further assessment of permafrost-related methane fluxes and role of sea ice. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 2015; 373:20140451. DOI: 10.1098/rsta.2014.0451 EDN: UZYQRR
37. Shakhova N.E., Semiletov I.P. Methane Hydrate Feedbacks, In: Martin Sommerkorn & Susan Joy Hassol, eds., Arctic Climate Feedbacks: Global Implications, Published by WWF International Arctic Program August, 2009; 81–92. ISBN: 978-2-88085-305-1
38. Shakhova N., Semiletov I., Salyuk A., et al. Extensive Methane Venting to the Atmosphere from Sediments of the East Siberian Arctic Shelf. *Science*, 2010; 327(5970):1246–1250. DOI: 10.1126/science.1182221 EDN: MXGVPH
39. Chernykh D., Yusupov V., Salomatin A., et al. Sonar Estimation of Methane Bubble Flux from Thawing Subsea Permafrost: A Case Study from the Laptev Sea Shelf. *Geosciences*, 2020; 10(10):411. DOI: 10.3390/geosciences10100411 EDN: SQLOLB
40. Chuvilin E., Ekimova V., Bukhanov B., Grebenkin, S., Shakhova N., Semiletov I. Role of Salt Migration in Destabilization of Intra Permafrost Hydrates in the Arctic Shelf: Experimental Modeling. *Geosciences*, 2019; 9:188. DOI: 10.3390/geosciences9040188 EDN: EEEMKL
41. Yusupov V., Semiletov I. Understanding the processes associated with the formation and decomposition of gas hydrates on the Arctic shelf. *Fuel*, 2025; 388:134472. DOI: 10.1016/j.fuel.2025.134472 EDN: TMWDYY
42. Semiletov I.P., Shakhova N.E. Greenhouse Gas Balance and Climate Change: The Role of Permafrost Degradation in the Arctic. *Bulletin of the Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences*, 2024, no. 4, pp. 5–43. DOI: 10.31857/S0869769824040015

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Григорьевич Алексеев*, д-р техн. наук, доцент, профессор, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru
ORCID 0000-0001-6020-0328

Andrey G. Alekseev*, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru
ORCID 0000-0001-6020-0328

Виталий Геннадьевич Крючков, д-р экон. наук, академик РИА, генеральный директор, АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: kryuchkov@dstroy.ru

Vitaly G. Kryuchkov, Dr. Sci. (Economy), Academician of the REA, General Director, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: kryuchkov@dstroy.ru

Михаил Николаевич Железняк, д-р геол.-минерал. наук, член-корреспондент РАН, академик АН Республики Саха (Якутия), директор, Институт мерзлотоведения СО РАН, Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, Якутск
e-mail: fe1956@mail.ru

Mikhail N. Zheleznyak, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), Corresponding Member of the RAS, Academician of the Academy of Sciences (Republic Sakha (Yakutia)), Director, Melnikov Permafrost Institute SB RAS, Yakutsk
e-mail: fe1956@mail.ru

Леопольд Исаевич Лобковский, академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, Москва, Россия
e-mail: llobkovsky@ocean.ru

Leopold I. Lobkovsky, Academician of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. (Physical and Mathematical), Professor P.P. Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences. Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia
e-mail: llobkovsky@ocean.ru

Игорь Петрович Семилетов, член-корреспондент Российской Академии наук, доктор географических наук, Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичёва ДВО РАН, Владивосток, Российская Федерация

Национальный исследовательский Томский государственный университет, проспект Ленина, д. 36, Томская область, г. Томск, 634050, Российская Федерация

Институт экологии, Высшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, г. Москва, 109028, Российская Федерация

e-mail: ipsemiletov@gmail.com

Igor P. Semiletov, Corresponding member of the Russian Academy of Sciences, Dr. Sci. of (Geography), Ilyichev Pacific Oceanological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russian Federation

National Research Tomsk State University, Lenina street, 36, Tomsk, 634050, Russian Federation

Institute of Ecology, Higher School of Economics, Pokrovskii street, Moscow, 109028, Russian Federation
e-mail: ipsemiletov@gmail.com

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

НЕСУЩАЯ СПОСОБНОСТЬ БУРООПУСКНОЙ СВАИ В МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ГРУНТАХ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЦЕМЕНТНО-ПЕСЧАНОГО РАСТВОРА

П.М. САЗОНОВ¹

¹АО «НИЦ «Строительство» НИИОСП им. Н.М. Герсеванова, 2-я Институтская ул., д. 6, стр. 12, Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Буроопускные сваи широко применяются в строительстве на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) по принципу I. Современные проекты всё чаще используют цементно-песчаный раствор (ЦПР), однако его тепловое взаимодействие с грунтом и сваем, а также прочность смерзания на контакте изучены недостаточно. Это приводит к занижению расчётной несущей способности и неоправданному перерасходу материалов.

Цель. Разработать методику определения несущей способности буроопускной сваи в ММГ при использовании ЦПР, учитывающую тепловыделение при гидратации цемента и частичное твердение раствора до замерзания.

Материалы и методы. Выполнена серия теплотехнических расчётов в программном комплексе «Борей 3D» для различных типоразмеров свай, диаметров скважин и температур ММГ. Проведены лотковые эксперименты, моделирующие часть буроопускной сваи. Прочность смерзания ЦПР с бетонной поверхностью определена по ГОСТ 12248.8 для каждого сочетания температуры (от –1 до –6 °С) и времени выдержки при положительной температуре (1–7 сут.). Аппроксимация выполнена двухэтапным методом наименьших квадратов с линеаризацией и нелинейным уточнением.

Результаты. Получена номограмма времени замерзания раствора в зависимости от его объёма и температуры ММГ. Установлено, что при выдержке ЦПР до 7 сут. при положительной температуре прочность смерзания возрастает в 1,5 раза по сравнению с песчаным раствором. Выведена эмпирическая формула определения сопротивления ЦПР сдвигу по поверхности смерзания с бетонной сваем.

Выводы. Предложена методика расчёта несущей способности буроопускной сваи с ЦПР. Данная методика позволит оптимизировать проекты свайных фундаментов на ММГ, снизить избыточный запас прочности, что приведет к экономии материалов без ущерба для надежности фундамента.

Ключевые слова: буроопускные сваи, многолетнемерзлые грунты, цементно-песчаный раствор, сопротивление сдвигу по поверхности смерзания, несущая способность свай, методика расчета

Для цитирования: Сазонов П.М. Несущая способность буроопускной сваи в многолетнемерзлых грунтах при использовании цементно-песчаного раствора // Вестник НИЦ «Строительство». 2026. № 2(49). С. 123–138. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-123-138](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-123-138) EDN: KCMVRI

Вклад автора

Автор выполнил: численное моделирование теплового взаимодействия свай и многолетнемерзлых грунтов, лотковые эксперименты моделей свай, определение прочности смерзания цементно-песчаного раствора и сваи путем проведения лабораторных испытаний методом одноплоскостного среза, разработка формул определения времени нахождения раствора при положительной температуре до момента замерзания и определения прочности смерзания в зависимости от температуры мерзлых грунтов и типоразмера сваи, разработка методики расчета несущей способности сваи при использовании цементно-песчаного раствора.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 07.05.2026

Поступила после рецензирования 28.05.2026

Принята к публикации 05.06.2026

BEARING CAPACITY OF SLURRIED PILES IN PERMAFROST SOILS USING CEMENT-SAND MORTAR

P.M. SAZONOV

JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya Street, Building 12, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. Slurried piles are widely used in construction on permafrost soils according to Principle I. Modern projects increasingly employ cement-sand mortar (CSM), yet its thermal interaction with the soil and the pile, as well as the freeze-bond strength at the contact interface, remain insufficiently studied. This leads to an underestimation of the design bearing capacity and unjustified overconsumption of materials.

Aim. To develop a method for determining the bearing capacity of a slurried pile in permafrost using CSM, taking into account the heat release during cement hydration and partial hardening of the mortar prior to freezing.

Materials and methods. A series of thermotechnical calculations was performed using the Borey 3D software package for various pile types, borehole diameters, and permafrost temperatures. Tray experiments simulating a segment of a slurried pile were conducted. The freeze-bond strength of CSM with a concrete surface was determined according to GOST 12248.8 for each combination of temperature (from -1 to -6 °C) and curing time at positive temperatures (1 to 7 days). Approximation was performed using a two-stage least squares method with linearization and nonlinear refinement.

Results. A nomogram of mortar freezing time as a function of mortar volume and permafrost temperature was obtained. It was found that when CSM is cured for up to 7 days at positive temperatures, the freeze-bond strength increases by a factor of 1.5 compared to sand mortar. An empirical formula for determining the shear resistance of CSM along the freeze-bond interface with a concrete pile was derived.

Conclusions. A calculation method for the bearing capacity of a slurried pile with CSM is proposed. This method will allow optimization of pile foundation designs on permafrost and reduce excessive safety margins, leading to material savings without compromising foundation reliability.

Keywords: slurried piles, permafrost soils, cement-sand mortar, shear resistance at the freezing surface, pile bearing capacity, calculation method

For citation: Sazonov P.M. Bearing capacity of slurried piles in permafrost soils using cement-sand mortar. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2026, no. 2 (49), pp. 123–138. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-123-138](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-123-138) EDN: KCMVRI

Author contribution statement

The author carried out the work: modeling of the thermal interaction between piles and permafrost soils, tray experiments with pile models, determination of the freezing strength of cement-sand mortar and piles through laboratory tests using the single-plane shear method, development of formulas for determining the time that the mortar remains at a positive temperature before freezing, and determination of the freezing strength depending on the temperature of the frozen soils and the size of the pile, as well as development of a methodology for calculating the bearing capacity of piles using cement-sand mortar.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 07.05.2026

Revised 28.05.2026

Accepted 05.06.2026

Введение

Самым распространенным видом фундаментов при строительстве на многолетнемерзлых грунтах (ММГ) по принципу I с сохранением грунтов оснований в мерзлом состоянии являются буропускные сваи [1–7]. Проведенными в советское время исследованиями детально изучены тепловые процессы вмораживания буропускных свай в грунт, а также прочностные свойства грунтовых растворов (глинистых, песчаных и известково-песчаных). На современных строительных объектах применяется, как правило, цементно-песчаный раствор (ЦПР) [8]. На сегодняшний день не исследовано формирование температурного режима ММГ при устройстве буропускных свай с использованием ЦПР, не определены сопротивления ЦПР сдвигу по поверхности смерзания со свайей (прочность смерзания). В связи с этим несущая способность буропускных свай при использовании ЦПР рассчитывается без учета тепловыделения при гидратации цемента и частичной гидратации цемента [9, 10]. Расчетная несущая способность оказывается заниженной по сравнению с фактической, что вынуждает проектировщиков закладывать в проект избыточное количество свай, а также увеличивать их длину и диаметр. Практика строительства показывает, что фактическая несущая способность буропускных свай зачастую выше расчетной, что подтверждает предположение об имеющихся резервах.

1. Тепловое взаимодействие раствора со свайей и многолетнемерзлым грунтом

В связи с тем, что ЦПР преимущественно состоит из песка, на начальном этапе в программном комплексе Борей 3D проведено компьютерное моделирование изменения температуры песчаного раствора во времени без добавления цемента. Теплотехнические расчеты выполнены для получения зависимостей изменения температуры песчаного раствора во времени (от момента заливки в скважину до момента приобретения раствором температуры окружающего грунта) при различных исходных факторах: типоразмер и материал сваи (железобетонные сечением от 300×300 мм до 400×400 мм и стальные трубчатые диаметром от 159 мм до 530 мм), диаметр лидерной скважины (от 250 мм до 750 мм), температура ММГ (от минус $0,3^\circ\text{C}$ до минус 10°C). При моделировании стальных трубчатых свай учитывалось, что конструктивные решения могут предусматривать закрытый нижний конец (раствор заполняет только пространство между свайей и стенкой лидерной скважины) и открытый нижний конец (раствор заполняет пространство как между свайей и стенкой лидерной скважины, так и внутри трубчатой сваи). Данные исследования позволяют всесторонне оценить возможные температурные режимы и сравнить их в дальнейшем с температурными режимами

при добавлении в песчаный раствор цемента, на основании чего определить влияние добавления цемента в песчаный раствор на формирование температурного режима. Рассмотренные типоразмеры буроопускных свай представлены в таблице 1. С учетом трех вариантов конструкции свай, трех сечений для железобетонных и пяти – для стальных свай, трех диаметров лидерной скважины для каждого сечения, а также восьми температурных режимов ММГ, общее количество выполненных теплотехнических расчетов составило 312.

Таблица 1

Типоразмеры буроопускных свай

Table 1

Standard sizes of slurried piles

Тип свай	Сечение свай, мм	Диаметр лидерной скважины, мм
железобетонная	300 × 300	500, 550, 600
	350 × 350	550, 600, 650
	400 × 400	650, 700, 750
стальная труба	Ø159	250, 300, 350
	Ø219	300, 350, 400
	Ø325	400, 450, 500
	Ø426	500, 550, 600
	Ø530	600, 650, 700

В результате теплотехнических расчетов определено время, в течение которого раствор находится при положительной температуре перед замерзанием. Данное время зависит от объема раствора и температуры окружающего массива мерзлого грунта. В свою очередь объем раствора зависит от диаметра лидерной скважины и размера свай. Для всех рассмотренных случаев типоразмеров буроопускных свай время замерзания составило от 3 часов – вариант со свай из стальной трубы с острием Ø159 мм в лидерной скважине Ø250 мм в ММГ с температурой минус 10 °С до 6 месяцев – вариант со свай из стальной трубы без острия Ø530 мм в лидерной скважине Ø700 мм в ММГ с температурой минус 0,3 °С.

По полученным теплотехническим моделированием графикам изменения температуры песчаного раствора на контакте со свай построена номограмма времени нахождения раствора до момента замерзания (сутки) в зависимости от объема раствора и температуры ММГ (рис. 1), которая описывается формулой (1), справедливой для температур ММГ от минус 0,3 °С и ниже.

$$t = 133,33 \frac{V}{T}, \quad (1)$$

где t – время замерзания раствора, сут.;

V – объем раствора на один метр высоты свай, м³;

T – температура ММГ, °С.

Для определения степени сходимости температурных изменений при устройстве буропускной сваи при использовании песчаного раствора и ЦПР проведены исследования в лотках диаметром 1000 мм (рис. 2). Цилиндрический лоток моделирует участок буропускной сваи высотой 300 мм. Диаметр лотка выбран из расчета недопущения полного оттаивания мерзлого грунта после заливки раствора. Лоток устанавливается в морозильной камере, в которой постоянно поддерживается отрицательная температура минус 4 °С (эксперимент № 1), минус 3 °С (эксперимент № 2), минус 5 °С (эксперимент № 3), минус 1 °С (эксперимент № 4). Основные параметры лотковых экспериментов представлены в таблице 2 и таблице 3. Фото лотков в процессе их устройства в момент, предшествующий заливке раствора, представлены на рис. 3. Основные результаты экспериментов сведены в таблице 4.

Таблица 2

Параметры лотковых экспериментов

Table 2

Parameters of the tray experiments

№ эксп.	Диаметр лотка, мм	Диаметр лидерной скважины, мм	Модель сваи	Грунт и его температура, °С	Раствор, его температура, °С
1	1000	630	стальная труба Ø426 × 9	песок, -5	песчаный, +20
2	1000	630	стальная труба Ø426 × 9	песок, -3	цементно-песчаный, +20
3	1000	530	ж/б 350 × 350	песок, -5	цементно-песчаный, +20
4	1000	530	ж/б 350 × 350	суглинок, -1	цементно-песчаный, +20

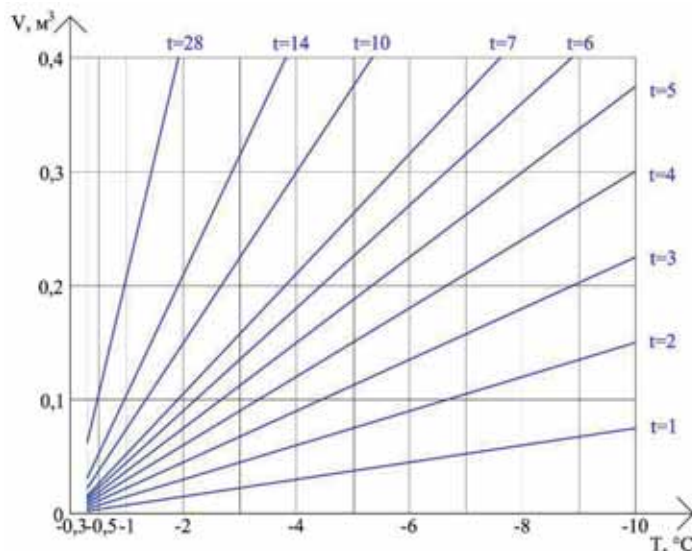


Рис. 1. Номограмма для определения времени нахождения раствора до момента замерзания (t , сутки) в зависимости от объема раствора (V) и температуры ММГ (T)

Fig. 1. Nomogram for determining the time before the onset of freezing (t , days) as a function of mortar volume (V) and permafrost temperature (T)

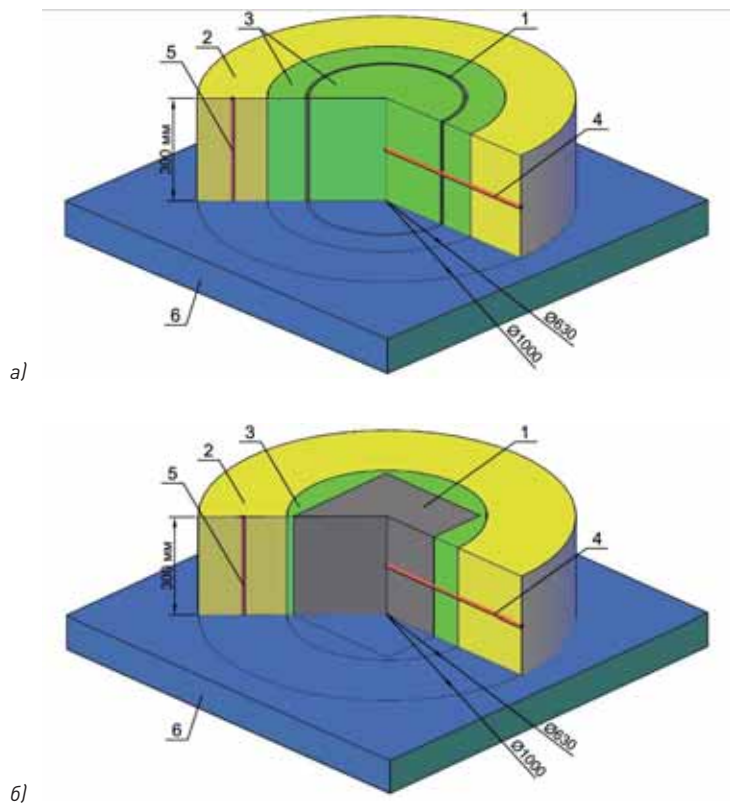


Рис. 2. Схемы цилиндрических лотков (верхняя плита пенополистирола условно не показана)
а) с металлической свайей из стальной трубы Ø426 мм (эксперименты № 1 и № 2), б) с ж/б свайей сечением 350 × 350 мм (эксперименты № 3 и № 4); 1 – модель сваи, 2 – грунт, 3 – ЦПР, 4 – термометрическая коса в радиальном направлении, 5 – термометрическая коса в вертикальном направлении, 6 – пенополистирол толщиной 100 мм

Fig. 2. Layouts of the cylindrical tray models (the upper polystyrene foam plate is not shown conditionally)
a) with a steel pipe pile (Ø426 mm) [experiments Nos. 1 and 2], b) with a concrete pile (350 × 350 mm) (experiments Nos. 3 and 4); 1 – pile model; 2 – soil; 3 – cement-sand mortar; 4 – thermometric string in radial direction; 5 – thermometric string in vertical direction; 6 – polystyrene foam, 100 mm thick

Таблица 3

Свойства грунта, раствора, бетона

Table 3

Properties of soil, mortar, and concrete

№ эксп.	Грунт	Влажность, W , %	Плотность, ρ , кг/м ³	Плотность скелета грунта, ρ_d , кг/м ³	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C)		Коэффициент теплоемкости, кДж/(м ³ ·°C)		Температура начала заморозания, T_{bf} , °C
					λ_f	λ_{th}	c_f	c_{th}	
1	песок	19,8	1987	1659	4,423	2,101	1,981	2,076	-0,01
2	песок	11,0	1800	1621	4,423	2,101	1,981	2,08	-0,01
3	песок	21,5	1980	1630	3,0	2,02	3250	3613	-0,02
4	суглинок	30,0	1846	1420	1,55	1,4	2740	3430	-0,02
1	песчаный раствор	21,0	1980	1630	3,00	2,02	3,25	3,61	-0,02
2, 3, 4	ЦПР	0,5	2,42	-	2,64	1,74	2672	3641	-
3, 4	бетон	-	2,31	-	2,04	2,04	909,3	1206,9	-

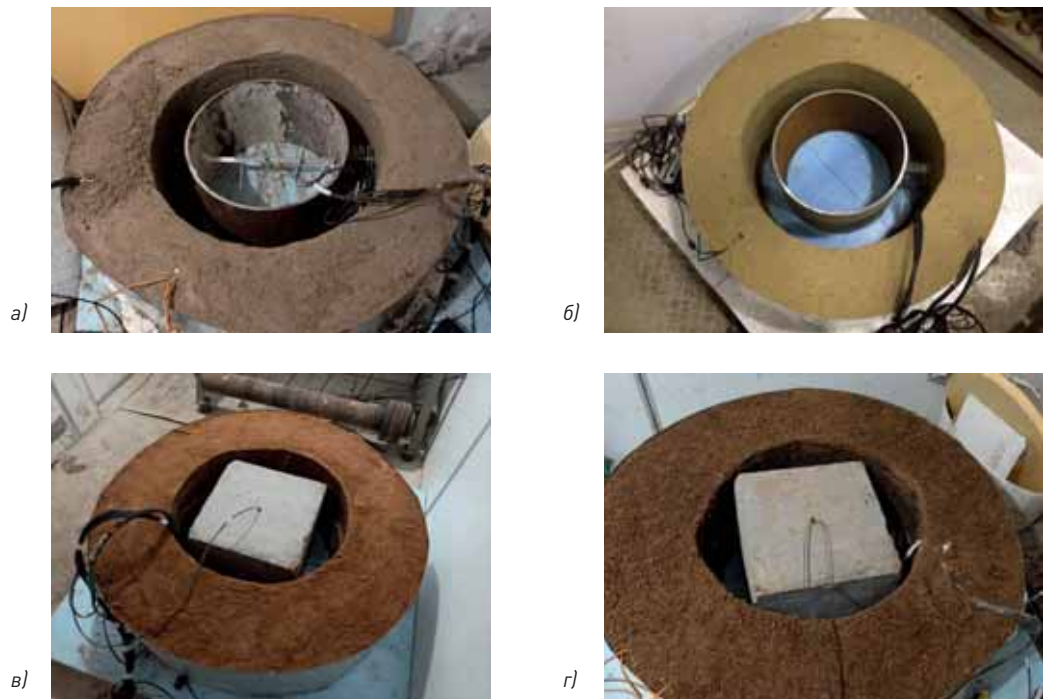


Рис. 3. Фото подготовки экспериментов
а) № 1, б) № 2, в) № 3, г) № 4

Fig. 3. Photos of experiment preparation
a) no. 1, b) no. 2, c) no. 3, d) no. 4

Результаты экспериментов

Table 4

№ эксп.	Радиус растепления, мм	Время t_1 , сут. (ч)	Время t_2 , сут. (ч)	Время t_3 , сут. (ч)	Время t_4 , сут. (ч)	Время t_5 , сут. (ч)	Время t_6 , сут. (ч)	Время t_7 , сут. (ч)	Описание температурного скачка в результате гидратации цемента	Максимальная температура на границе лотка, °С
1	88	5,6 (134)	10,6 (254)	3,8 (92)	10,6 (254)	2,3 (56)	10,6 (254)	1,1 (26)	отсутствует	-0,72
2	87,5	11,7 (281)	27,5 (660)	9 (215)	27,5 (660)	7,7 (185)	24,2 (581)	7,2 (173)	имеется, повышение в период с 48 ч до 92 ч на 2 градуса	-0,73
3	33,7	0,4 (9)	9,1 (219)	0,9 (21)	8,9 (213)	0,4 (9)	8,9 (213)	0,2 (5)	отсутствует	-1,98
4	167,4	17,5 (420)	39,5 (948)	18,5 (420)	39,5 (948)	16,5 (393)	39,5 (948)	15,5 (372)	имеется, повышение в период с 12 ч до 180 ч на 1,5 градуса	-0,46

Примечания:

1) t_1 – время до замерзания в центре (установления 0 °С);

2) t_2 – время до полного вмерзания в центре (установления температуры эксперимента);

3) t_3 – время до замерзания на контакте со сваей (установления 0 °С);

4) t_4 – время до полного вмерзания на контакте со сваей (установления температуры эксперимента);

5) t_5 – время до замерзания на контакте с грунтом (установления 0 °С);

6) t_6 – время до полного вмерзания на контакте с грунтом (установления температуры эксперимента);

7) t_7 – время восстановления отрицательной температуры грунта.

Для сравнения динамики температурного режима песчаного раствора и ЦПР определенные в лотковых экспериментах зависимости распределения температуры раствора во времени нанесены на один рисунок с результатами программного моделирования (рис. 4).

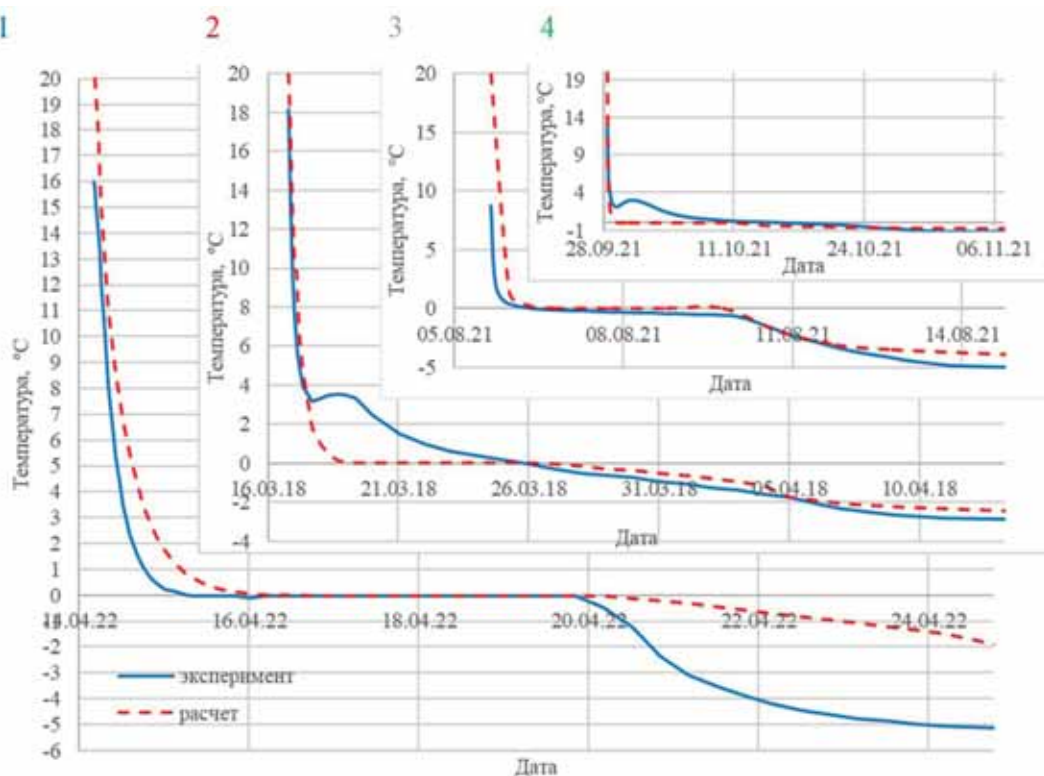


Рис. 4. Сравнение результатов экспериментов № 1–4 и соответствующих расчетов
 1, 2, 3, 4 – номер эксперимента

Fig. 4. Comparison of the results of Experiments Nos. 1–4 with the corresponding calculations
 1, 2, 3, 4 – experiment number

Сравнение графиков изменения температуры во времени ЦПР (из экспериментов) и песчаного (из расчетов) показывает, что в целом графики похожи и не имеют значительных расхождений. Это объясняется быстрым охлаждением ЦПР до околонулевых температур, при которых тепловыделение от ЦПР заметно не проявляется. Количество тепла, которое вносится в многолетнемерзлый массив грунта при применении ЦПР незначительно больше, чем при применении песчаного раствора, не содержащего цемент. В двух экспериментах из трех зафиксировано локальное небольшое повышение температуры ЦПР по сравнению с песчаным раствором в начальный период замерзания раствора. Данное, ограниченное во времени (от 1 до 5 дней), повышение температуры на 1,5–2 °С объясняется частичной гидратацией цемента с выделением незначительного количества тепла. В эксперименте № 2 наличие скачка объясняется большим количеством раствора (внутри и снаружи трубы) при температуре мерзлого грунта минус 3 °С. В эксперименте № 4 наличие скачка объясняется высокой температурой мерзлого грунта минус 1 °С (в эксперименте № 3 при температуре минус 5 °С такого скачка не наблюдается).

На основании данного сравнения сделан вывод, что номограмма времени нахождения раствора до момента замерзания в зависимости от объема раствора и температуры ММГ (рис. 1), полученная для песчаного раствора, подходит и для ЦПР.

2. Прочность смерзания цементно-песчаного раствора на контакте с материалом сваи в условиях частичной гидратации

Несмотря на схожесть температурных условий замерзания раствора в пространстве между поверхностью сваи и стенкой скважины, следует предположить, что набирающий прочность за счет гидратации цемента ЦПР имеет отличные от замерзшего песчаного раствора прочностные свойства (R_{af}). При этом прочность контакта зависит от степени гидратации цемента, т.е. от времени нахождения при положительной температуре до момента замерзания.

Для установления зависимости прочности смерзания ЦПР с бетонной свайей при различной степени гидратации цемента проведены лабораторные исследования по ГОСТ 12248.8 [11] на образцах, подготовленных по специальной методике, разработанной на основании анализа результатов теплотехнического моделирования. Методика заключается в выдержке образцов после их заливки при положительной температуре в течение заранее установленного интервала времени, и дальнейшем замораживании частично затвердевших образцов при различных отрицательных температурах [12, 13].

Исследования прочности смерзания проведены для буроопускных свай с объемом пазух на один метр высоты от 0,05 до 0,3 м³ при температуре от минус 1 до минус 6 °С соответственно. Для данных граничных условий время нахождения ЦПР при положительной температуре до момента замерзания составляет не более семи суток. Анализируя изменение температуры ЦПР во времени, отмечено, что она резко падает с 20 °С до околонулевых положительных значений в первые часы после заливки в скважину. В дальнейшем раствор либо быстро замерзает, либо находится при околонулевых положительных температурах несколько дней, и только после этого замерзает. В работе принято, что гидратация цемента после замерзания ЦПР не происходит [14].

Состав ЦПР принят одинаковым для всех экспериментов по [15] с заменой марки цемента М300 на М500 состава: портландцемент (марки М500) 450 кг, песок воздушно-сухой 1410 кг, вода 410 л. Начальная температура раствора принята +20 °С [4]. В качестве имитации сваи принята бетонная плашка, имитирующая поверхность железобетонной сваи. Испытания проведены при температуре минус 1, минус 3 и минус 6 °С. Испытания проведены при выдержке образцов после их приготовления при положительной температуре плюс 3 °С в течение 1, 2, 3, 5 и 7 суток. Для каждого срока выдержки при плюсе и температуре испытаний приготовлено и испытано по шесть образцов.

Аппроксимация опытных данных выполнена с использованием двумерной степенной зависимости, учитывающей влияние температуры T (°С) и времени до замерзания ЦПР t (сут) на прочность смерзания R_{af} (кПа):

$$R_{af} = A_0 (0,7 - T)^k (t + 1)^a. \quad (2)$$

Для аппроксимации привлечены результаты лабораторных испытаний в срезных приборах. Поскольку для каждого сочетания T и t выполнялось по 6 параллельных измерений, предварительно выполнена статистическая обработка опытных данных: для каждой уникальной пары (T, t) вычислено расчётное значение прочности смерзания с учётом ко-

эффициента надёжности по грунту. Такой подход позволяет учесть естественную неоднородность грунтового основания и получить устойчивые параметры модели, пригодные для инженерных расчётов.

Аппроксимация производится в два этапа. На первом этапе определяется первое приближение параметров уравнения (2) методом замены переменных с линеаризацией:

$$Y = \ln(R_{af}) = \ln(A_0) + k \ln(0,7 - T) + a \ln(t + 1) = L_0 + kX_1 + aX_2, \tag{3}$$

где $L_0 = \ln(A_0)$, $X_1 = \ln(0,7 - T)$, $X_2 = \ln(t + 1)$.

Для оценки коэффициентов L_0 , k и a применяется метод наименьших квадратов (МНК).

На втором этапе выполняется нелинейное уточнение полученных параметров путем прямой аппроксимации исходной нелинейной функции (2) с использованием найденных значений в качестве стартового приближения. Уточнение проведено с помощью процедуры нелинейной регрессии среды математического моделирования *Engsee* [16]. В результате аппроксимации получены следующие коэффициенты:

$$A_0 = 76,5, \quad k = 0,730, \quad a = 0,342.$$

На рис. 5 приведены результаты аппроксимации с обозначением опытных данных (частных и расчетных значений R_{af}). Таким образом сопротивление ЦПР сдвигу по поверхности смерзания с бетонной сваей определяется по формуле:

$$R_{af} = 76,5 \left((0,7 - T)^{0,73} \right) (t + 1)^{0,342}, \tag{4}$$

где T – температура ММГ, °С;
 t – время заморзания ЦПР, сут.

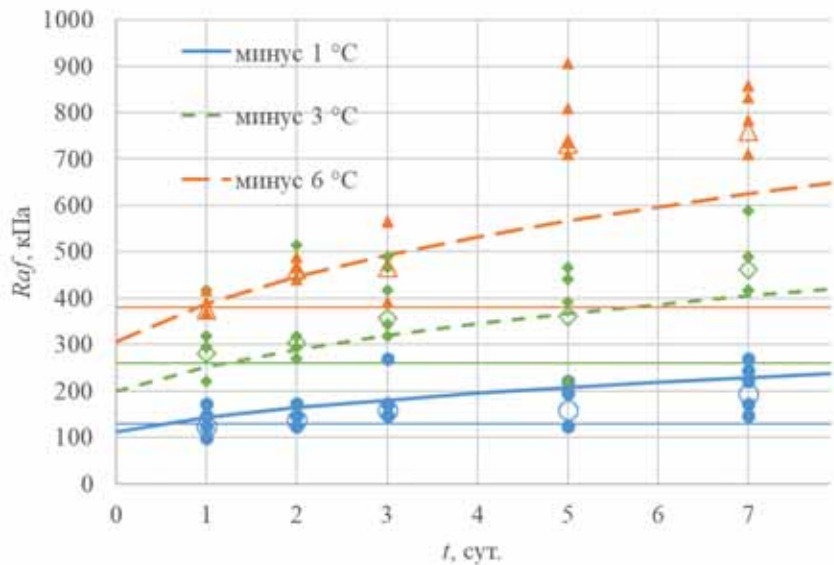


Рис. 5. Зависимость расчетного сопротивления ЦПР сдвигу по поверхности смерзания (R_{af}) от времени до заморзания (t)

Fig. 5. Design shear resistance of the cement-sand mortar along the freezing surface (R_{af}) as a function of time to freezing (t)

На рис. 5 нанесены горизонтальные линии, показывающие силы смерзания песчаного раствора с бетоном согласно табл. В.3 СП 25.13330 [17]. Указанные значения (130, 260 и 380 кПа при температурах минус 1, минус 3 и минус 6 °С соответственно) не зависят от времени нахождения образцов песчаного раствора при положительной температуре до момента замерзания. Результаты испытаний ЦПР показывают, что в случае быстрого замерзания образцов (за одни сутки), силы смерзания сопоставимы с песчаным раствором. При увеличении времени нахождения ЦПР до его замерзания, силы смерзания увеличиваются. Образцы ЦПР, выдержанные семь суток перед замерзанием, показали увеличение R_{af} в 1,5 и более раза в интервале температур от минус 0,3 °С до минус 10 °С.

3. Методика определения несущей способности буроопускной сваи при использовании цементно-песчаного раствора

На основании полученных результатов исследований предлагается усовершенствовать нормативную методику определения несущей способности буроопускной сваи в части возможности учета ЦПР. По СП 25.13330 для расчета несущей способности F_u используется расчетное сопротивление грунтового раствора сдвигу по боковой поверхности смерзания R_{af} . Значения R_{af} определяются лабораторными испытаниями, однако согласно п.5.9 СП 25.13330 есть случаи, когда допускается пользоваться табличными значениями. Табличные значения R_{af} для глинистых, песчаных и известково-песчаных растворов даны в табл.В.3 СП 25.13330. Для ЦПР табличные данные отсутствуют. Учитывая вышесказанное, разработана методика (рис.6), включающая два подхода: первый базируется на использовании табличных значений, второй – на проведении лабораторных испытаний.

В случаях, когда нормативные требования по проектированию допускают пользоваться табличными значениями R_{af} , предлагается дополнить табл. В.3 новыми данными по ЦПР. При этом следует различать два варианта. Первый вариант не учитывает возрастание сил смерзания ЦПР за счет гидратации цемента. При таком варианте следует использовать значения песчаного раствора из табл. В.3. Фактические более высокие значения R_{af} идут в запас несущей способности. Второй вариант учитывает увеличение сил смерзания за счет частичной гидратации цемента в составе ЦПР. Определенные по (4) расчетные сопротивления ЦПР сдвигу по поверхности смерзания представлены в таблице 5.

Таблица 5

R_{af} при различной температуре и для различных сроков замерзания

Table 5

R_{af} at different temperatures and for different freezing times

Время замерзания, сут.	Расчетные сопротивления R_{af} , кПа, при температуре грунта, °С											
	-0,3	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4	-6	-8	-10
≤1	50	80	130	160	200	230	260	290	330	380	440	500
2	111	127	164	198	230	260	289	318	345	447	540	628
3	123	140	181	219	254	287	319	350	380	493	596	693
4	133	152	195	236	274	310	345	378	411	532	644	748
5	141	161	208	251	292	330	367	402	437	566	685	797
6	149	170	219	265	307	348	387	424	461	597	722	840
≥7	156	178	229	277	322	364	405	444	482	625	756	879

Следует отметить, что выявленная тенденция возрастания сил смерзания с увеличением количества дней перед замерзанием раствора позволяет применять значения R_{af} для случаев нахождения раствора при положительной температуре более семи суток равным семи суткам.

Расчет несущей способности по первому подходу усовершенствованной методики, используя табличные значения, повторяет действующую в настоящее время нормативную методику расчета несущей способности буроопускной сваи с песчаным, глинистым или известково-песчаным растворами, дополняя её только значениями сопротивления ЦПР сдвигу по поверхности смерзания с фундаментом R_{af} в зависимости от времени его замерзания (таблица 6). В графическом виде данная информация приведена на рис.7.

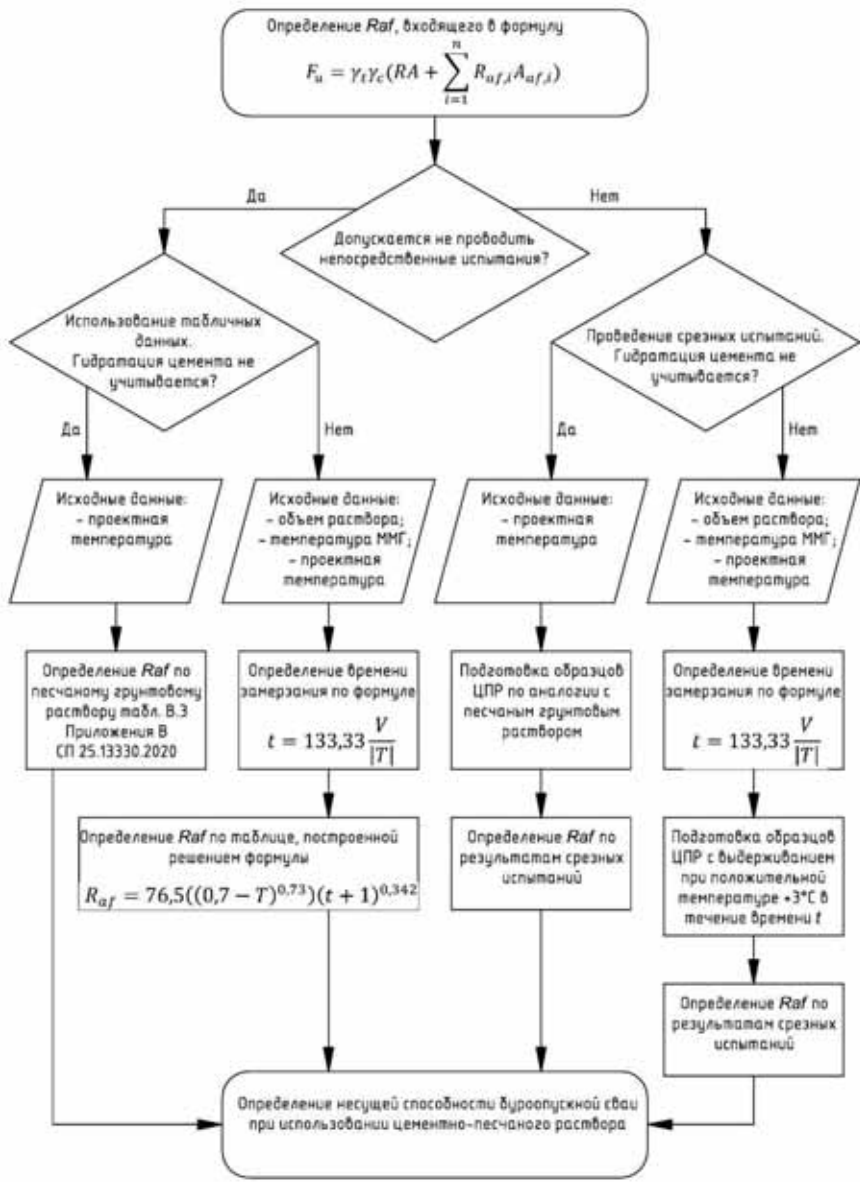


Рис. 6. Блок-схема определения несущей способности буроопускной сваи при использовании ЦПР
Fig. 6. Flowchart for determining the bearing capacity of a slurry pile using cement-sand mortar

Таблица 6

Расчетные сопротивления мерзлых незасоленных грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхности смерзания с фундаментом R_{af}

Table 6

Calculated shear resistance of frozen non-saline soils and soil solutions along the freezing surface with the foundation R_{af}

Грунты	Расчетные сопротивления R_{af} , кПа, при температуре грунта, °С											
	-0,3	-0,5	-1	-1,5	-2	-2,5	-3	-3,5	-4	-6	-8	-10
Глинистые	40	60	100	130	150	180	200	230	250	300	340	380
Песчаные	50	80	130	160	200	230	260	290	330	380	440	500
Известково-песчаный раствор	60	90	160	200	230	260	280	300	350	400	460	520
ЦПР с учетом гидратации	156	178	229	277	322	364	405	444	482	625	756	879

Примечание – для ЦПР без учета гидратации допускается принимать по песчаному раствору. Значения R_{af} для ЦПР с учетом гидратации даны при его выдержке при положительной температуре до заморзания в течение 7 суток. Промежуточные значения для других сроков заморзания следует определять по формуле (4).

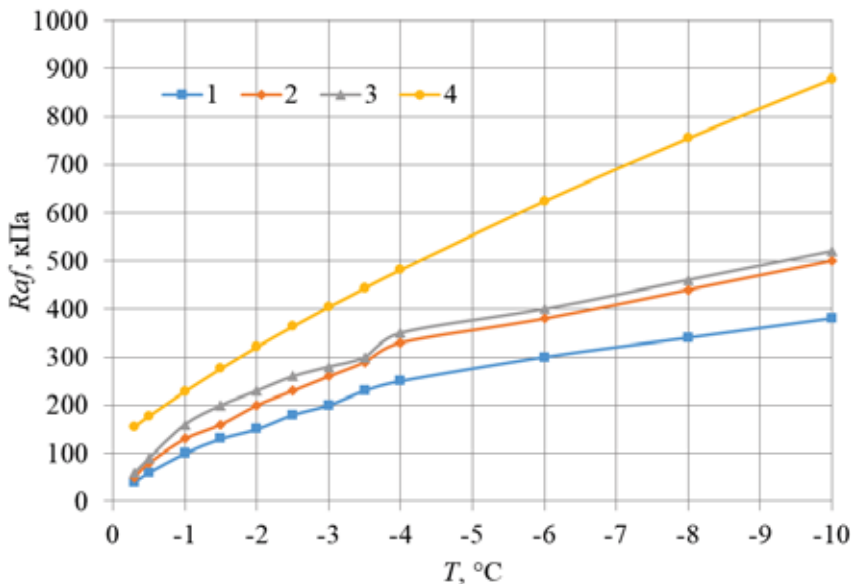


Рис. 7. Зависимость расчетного сопротивления мерзлых грунтов и грунтовых растворов сдвигу по поверхности смерзания (R_{af}) от температуры (T)

1 – глинистые, 2 – песчаные, 3 – известково-песчаный раствор, 4 – ЦПР

Fig. 7. Design shear resistance of frozen soils and grouts along the freezing surface (R_{af}) versus temperature (T)

1 – clayey soils; 2 – sandy soils; 3 – lime-sand grout; 4 – cement-sand mortar

В случаях, когда нормативные требования по проектированию регламентируют обязательное проведение испытаний для определения R_{af} лабораторные испытания в одноплоскостных приборах выполняются по двум сценариям. Первый – без учета гидратации цемента для получения минимальных значений свойств ЦПР, не привязываясь к проектным решениям, т.е. не зная, сколько времени раствор будет находиться при положительной температуре до своего заморзания. Второй – для получения

свойств ЦПР, формирующихся в конкретных условиях его твердения/замерзания для заранее известного проектного решения устройства буроопускных свай.

Согласно первому сценарию образцы для проведения одноплоскостных срезных испытаний должны готовиться как с обычным песчаным раствором. В этом случае на заранее подготовленную плашку, имитирующую поверхность фундамента, заливается ЦПР, после чего образец сразу помещается в холодильную камеру с температурой испытаний. После замерзания ЦПР образец загружается в срезной прибор для дальнейшего проведения испытания. Согласно второму сценарию образцы с ЦПР для лабораторного определения прочности смерзания сразу после заливки раствора в кольца должны переноситься в климатическую камеру, обеспечивающую изменяющиеся температурные условия твердения/замерзания ЦПР во времени. Температурный режим определяется решением теплотехнической задачи или опытным путем. Более простой способ обеспечения температурных условий подготовки образцов с ЦПР заключается в хранении образцов при температуре плюс 3 °С в течение времени, которое рассчитывается по (1). После выдержки требуемого времени образцы переносятся в морозильную камеру при температуре испытаний. После замерзания ЦПР образец загружается в срезной прибор для дальнейшего проведения испытания.

Заключение

Разработанная методика определения несущей способности буроопускной сваи с учетом применения ЦПР позволяет учитывать повышение прочностных свойств ЦПР за счет его частичного твердения перед замерзанием, благодаря чему оптимизировать проектные решения по фундаментам зданий и сооружений на ММГ. Использование разработанной методики дает возможность снизить избыточный запас несущей способности буроопускной сваи в 1,5 и более раза, что ведет к значительной экономии материалов без ущерба для надежности фундамента.

Список литературы

1. Докучаев В.В., Маркин К.Ф. Свайные фундаменты в вечноммерзлых грунтах. Л.: Стройиздат, 1972. 143 с.
2. Гончаров Ю.М., Ким М.В., Таргулян Ю.О., Вартанов С.Х. Производство свайных работ на вечноммерзлых грунтах. М., Стройиздат, 1971. 187 с.
3. Ерошенко В.Н. Свайные фундаменты в пластичноммерзлых грунтах. Л., Стройиздат, 1972. 175 с.
4. Таргулян Ю.О. Устройство свайных фундаментов в вечноммерзлых грунтах. Л., Стройиздат, 1978.
5. Тихомиров С.М. Исследование прочности смерзания и совершенствование методов расчета буроопускных свай в вечноммерзлых грунтах: дисс. канд. техн. наук. Москва, 1981. 220 с.
6. Цытович Н.А. Основания и фундаменты на мерзлых грунтах. М.: Изд-во АН СССР, 1958. 168 с.
7. Вялов С.С., Городецкий С.Э., Слепак М.Э. Свайные фундаменты в вечноммерзлых грунтах. Труды НИИОСП им. Н.М. Герсеванова. Выпуск 75. Москва: Производственные экспериментальные мастерские ВНИИИС Госстроя СССР, 1981. С. 51–61.
8. Сазонов П.М., Алексеев А.Г. Применение цементно-песчаного раствора при буроопускном способе погружения свай в многолетнемерзлые грунты // *Сборник докладов международной научно-технической конференции «Современные технологии проектирования и строительства фундаментов на многолетнемерзлых грунтах»*. Москва: Международная Ассоциация Фундаментостроителей, 2016. С. 19–23.
9. Алексеев А.Г., Сазонов П.М. Особенности расчета несущей способности буроопускных свай при проектировании фундаментов главного корпуса электростанции Ямал СПГ // *Геотехника*. 2018. Т. 10. № 1-2. С. 70–79.
10. Алексеев А.Г., Сазонов П.М., Зорин Д.В. К вопросу усовершенствования технологии устройства и расчета различных видов свай // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2019. № 1(20). С. 5–13.

11. ГОСТ 12248.8-2020. Грунты. Определение характеристик прочности мерзлых грунтов методом среза по поверхности смерзания. М.: Стандартинформ, 2020. 11 с.
12. Сазонов П.М., Алексеев А.Г. Термомеханическое взаимодействие буропусковых свай с многолетнемерзлыми грунтами // *Фундаменты*. 2022. № 1(7). С. 27–29.
13. Патент № 2755575 С1 Российская Федерация, МПК G01N 33/24, E02D 1/00. Способ приготовления образцов с цементно-песчаным раствором и устройство для его осуществления: № 2020134595: заявл. 21.10.2020: опубл. 17.09.2021 / П.М. Сазонов, А.Г. Алексеев; заявитель Акционерное общество «Научно-исследовательский центр «Строительство», АО «НИЦ «Строительство». EDN AKWBZO.
14. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования. М.: Стройиздат, 1975. 700 с.
15. Хрусталев Л.Н. Основы геотехники в криолитозоне. Москва: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 542 с.
16. Engee: среда технических вычислений и инженерного анализа: [сайт]. URL: <https://start.engee.com/?ysclid=mlwi27phft897299011>
17. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномёрзлых грунтах. Актуализированная редакция СНиП 2.02.04-88 (с изменениями № 1, № 2, № 3). М.: ФАУ «ФЦС», 2021. 123 с.

References

1. Dokuchaev V.V., Markin K.F. Pile foundations in permafrost soils. L.: Strojizdat, 1972. 143 p. (In Russian)
2. Goncharov Yu.M., Kim M.V., Targulyan Yu.O., Vartanov S.X. Production of pile works on permafrost soils. M., Strojizdat, 1971. 187 p. (In Russian)
3. Eroshenko V.N. Pile foundations in plasticfrozen soils. L., Strojizdat, 1972. 175 p. (In Russian)
4. Targulyan Yu.O. Installation of pile foundations in permafrost soils. L., Strojizdat, 1978. (In Russian)
5. Tikhomirov S.M. Research on frost resistance and improvement of methods for calculating bored piles in permafrost soils: diss. ... PhD in Technical Sciences. Moscow, 1981. 220 p. (In Russian)
6. Tsytovich N.A. Foundations and bases on frozen soils. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1958. 168 p. (In Russian)
7. Vyalov S.S., Gorodeczkij S.E., Slepak M.E. Pile Foundations in Permafrost Soils. *Proceedings of Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov*. Issue 75. Moscow, 1981, pp. 51–61. (In Russian)
8. Sazonov P.M., Alekseev A.G. Application of a cement-sand mortar in the drilling-and-setting method of pile driving in permafrost soils. *Collection of reports of the international scientific and technical conference "Modern technologies of designing and constructing foundations on permafrost soils"*. Moscow: International Association of Foundation Builders», 2016, pp. 19–23. (In Russian)
9. Alekseev A.G., Sazonov P.M. Features of calculating the load-bearing capacity of bored piles when designing the foundations of the main building of the Yamal LNG power plant. *Geotechnics*, 2018, vol. 10, no. 1-2, pp. 70–79. (In Russian)
10. Alekseev A.G., Sazonov P.M., Zorin D.V. On the issue of improving the technology of installing and calculating various types of piles. *Bulletin of Research Center of Construction*, 2019, no. 1(20), pp. 5–13. (In Russian)
11. GOST 12248.8-2020. Soils. Determination of the strength characteristics of frozen soils by cutting along the freezing surface. M.: Standartinform, 2020. 11 p. (In Russian)
12. Sazonov P.M., Alekseev A.G. Thermomechanical interaction of bored piles with permafrost soils. *Foundations*, 2022, no. 1(7), pp. 27–29. (In Russian)
13. Patent № 2755575 С1 Russian Federation, IPC G01N 33/24, E02D 1/00. Method for preparing samples with a cement-sand mortar and device for its implementation: № 2020134595: filed on. 21.10.2020: published on. 17.09.2021 / P.M. Sazonov, A.G. Alekseev; applicant: JSC Research Center Construction. EDN AKWBZO. (In Russian)
14. Mironov S.A. Theory and methods of winter concreting. M.: Strojizdat, 1975. 700 p. (In Russian)
15. Khrustalev L.N. Fundamentals of Geotechnics in the Cryolithozone. Moscow: Moscow University Press, 2005. 542 p. (In Russian)
16. Engee: Technical computing and engineering analysis environment: [website]. URL: <https://start.engee.com/?ysclid=mlwi27phft897299011>
17. SP 25.13330.2020. Soil bases and foundations on permafrost soils. M: FAU «FCzS», 2021. 123 p. (In Russian)

Информация об авторе / Information about the author

Павел Михайлович Сазонов, заведующий лабораторией геокриологических и геотехнических исследований № 8 НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: sazonov-pm@yandex.ru

Pavel M. Sazonov, Head of the Laboratory of Geocryological and Geotechnical Research № 8, Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: sazonov-pm@yandex.ru

УСИЛЕНИЕ ГРУНТОВ ОСНОВАНИЙ И УСТРАНЕНИЕ КРЕНОВ ДЕФОРМИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ ИНЪЕКЦИЕЙ ЦЕМЕНТНЫХ РАСТВОРОВ ПО ГИДРОРАЗРЫВНОЙ ТЕХНОЛОГИИ

О.А. ШУЛЯТЬЕВ¹, доктор технических наук

О.А. МОЗГАЧЕВА¹

В.Е. МЫШИНСКИЙ¹

С.Д. ИБРАГИМОВ²

В.В. ОРЕХОВ¹, доктор технических наук

¹Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсегова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

²ООО «КапительСтройПроект». Москва, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Активно развивающиеся в городах, в условиях плотной застройки, сложные виды геотехнических работ, такие, как строительство высотных зданий с глубокими котлованами, ограждающими конструкциями траншейного типа «стена в грунте» или буросекущими сваями, а также устройство глубоких фундаментов путем бурения скважин большого диаметра, влияют на окружающую застройку и нередко приводят к риску возникновения аварийных ситуаций.

В целях уменьшения осадок строящихся и существующих зданий и сооружений, а также исключения возникновения рисков аварийных ситуаций должны проводиться дополнительные мероприятия, направленные на усиление грунтов оснований.

Цель. Прекращение осадок и обеспечение эксплуатационной надежности здания торгово-развлекательного комплекса.

Материалы и методы. В статье рассматривается метод нагнетания цементных или других твердеющих растворов в грунт под высоким давлением, вызывающем в грунте разрывы, выполняемый через вертикально внедренные в грунт инъекторы. По образовавшимся разрывам раствор, перемещаясь под давлением на заданное расчетное расстояние, воздействует механически на грунт, изменяя его напряженно-деформированное состояние (НДС), повышая его прочностные свойства, а после твердения раствора – прочный материал в разрывах дополнительно армирует массив.

Результаты. Осадки фундаментов блоков торгово-развлекательного комплекса прекратились. Прочностные и деформационные характеристики грунтов в основании плитных фундаментов повысились. Намечалась тенденция к выравниванию фундаментных плит с подъемом отдельных участков. Относительная разность осадок плитных фундаментов снизилась.

Выводы. Представленные в статье результаты позволяют сделать вывод об эффективности применяемого метода компенсационного нагнетания, используемого для снижения осадок фундаментов, подъема зданий и выправлении их кренов, вызванных сложными геологическими условиями или ошибками в проектировании и строительстве.

Ключевые слова: компенсационное нагнетание, гидроразрыв, цементный раствор, цементный камень, напряжённо-деформированное состояние (НДС), массив грунта, усиление грунтов

Для цитирования: Шулятьев О.А., Мозгачева О.А., Мышинский В.Е., Ибрагимов С.Д., Орехов В.В. Усиление грунтов оснований и устранение кренов деформированных зданий инъекцией цементных растворов по гидроразрывной технологии // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2026. № 2(49). С. 139–156. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-139-156](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-139-156) EDN: FCTSCS

Вклад авторов

Шулятьев О.А. – руководство работой.

Мозгачева О.А. – оформление публикации.

Мышинский В.Е., Ибрагимов С.Д.,

Орехов В.В. – оформление публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.03.2026

Поступила после рецензирования 27.03.2026

Принята к публикации 02.04.2026

STRENGTHENING FOUNDATION SOILS AND ELIMINATING TILTS OF DEFORMED BUILDINGS BY IN-JECTING CEMENT MORTARS USING HYDRAULIC FRACTURING TECHNOLOGY

O.A. SHULYATYEV¹, Dr. Sci. (Engineering)

O.A. MOZGACHEVA¹

V.E. MYSHINSKY¹

S.D. IBRAGIMOV²

V.V. OREKHOV¹, Dr. Sci. (Engineering)

¹*Research, Design, and Engineering Institute of Foundations and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC "Research Center "Construction", Ryazansky Prospekt, 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

²*KapitelStroyProekt LLC. Moscow, Russian Federation*

Abstract

Introduction. Complex geotechnical works such as the construction of high-rise buildings with deep excavations, construction of trench-type diaphragm wall enclosing structures and bored-secant pile walls, as well as the construction of large-diameter boreholes for deep foundations installation actively develop in the dense urban conglomerations, affecting the adjoining surroundings and often leading to the risk of emergency situations.

Targeting at mitigating settlements of existing structures and those under construction and eliminating the risk of emergent situations, additional foundation strengthening measures should be undertaken.

Aim. Elimination of settlements and assurance of the reliable serviceability of a shopping Mall building.

Materials and methods. The paper considers a method of cement or other hardening solutions injection into the ground under high pressure creating fractures in the soil. The solution is pressurized through injectors vertically inserted into the soil. Moving under pressure along the created fractures over the prescribed distance, the solution mechanically affects the soil and changes its stress-strain-state, thus increasing soil strength properties. After hardening in fractures, solution additionally reinforces the soil.

Results. The settlement of foundation of the shopping Mall building terminated. Stress and strain properties of the soil under the foundation slabs increased. A trend toward leveling foundation slabs and raising individual sections has appeared. The relative differential settlement of the slab foundations has decreased.

Conclusions. The results presented show the efficiency of the applied method of the compensation grouting, which is used to reduce foundation settlements, lift buildings and correct their tilts caused by complex geological conditions or mistakes in design and construction.

Keywords: compensation injection, hydraulic fracturing, cement mortar, cement stone, stress-strain state (SSS), soil mass, soil reinforcement

For citation: Shulyatyev O.A., Mozgacheva O.A., Myshinsky V.E., Ibragimov S.D., Orekhov V.V. Strengthening foundation soils and eliminating tilts of deformed buildings by in-jecting cement mortars using hydraulic fracturing technology. *Bulleten of Scince and Reseach Center of Constraction*, 2026, no. 2(49), pp. 139–156. (In Russian) [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2\(49\)-139-156](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2026-2(49)-139-156) EDN: FCTSCS

Authors contribution statements

Shulyatyev O.A. – supervised the work.

Mozgacheva O.A. – designed the publication.

Myshinsky V.E., Ibragimov S.D. – performed the calculations and designed the publication

Orekhov V.V. – designed the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declares no conflict of interest.

Received 11.03.2026

Revised 27.03.2026

Accepted 02.04.2026

Введение

Активно развивающиеся в городах в условиях плотной застройки сложные виды геотехнических работ, такие, как строительство высотных зданий с глубокими котлованами, ограждаемыми конструкциями траншейного типа «стена в грунте» или буросекущими сваями, а также устройство глубоких фундаментов путем бурения скважин большого диаметра (2–3 м) глубиной 30 м, нередко приводят к риску возникновения аварийных ситуаций. Такие работы могут сопровождаться осадками и деформациями существующих зданий и сооружений или полным их разрушением. Проявление деформаций существующих или строящихся зданий из-за неравномерных осадок фундаментов, превышающих предельно допустимые значения, возможно и по ряду других причин. Например, они могут возникать по вине изыскателей или проектировщиков, когда прочностные свойства грунтов основания оцениваются и применяются в расчетах недопустимо завышенными. Деформации возможны также и из-за ошибок строителей – производителей работ.

В целях исключения и прекращения осадок строящихся и существующих зданий и сооружений должны проводиться дополнительные мероприятия, направленные на усиление естественно слабых грунтов оснований. Одним из эффективных способов, широко применяемых в фундаментостроении, является закрепление или усиление грунтов путем инъекции химических, цементных и других растворов. Закрепляемый грунт, в зависимости от его вида и водопроницаемости, можно превращать в камнеподобный материал, при

усилении грунта можно повысить его физико-механические и прочностные характеристики (φ , c , E). Закреплению с превращением в прочный материал, как правило, подвергаются хорошо водопроницаемые грунты, такие как песчаные и лессовые. Для их закрепления применяются как химические растворы (способы силикатизации или смолизации карбамидными смолами), так и цементные растворы, приготовленные из высокодисперсных микроцементов [1, 2]. Усиление грунта (т.е. «армирование») по гидроразрывной технологии с образованием линз цементного раствора, в том числе методом компенсационного нагнетания, возможно и в песчаных и в глинистых грунтах.

Метод компенсационного нагнетания в режиме гидроразрывной цементации положительно зарекомендовал себя на ряде строительных объектов и позволяет решать вопросы устройства и выравнивания фундаментов зданий и сооружений в сложных инженерно-геологических условиях. Показательным примером успешного применения инъекции по гидроразрывной технологии, выполненной подрядной организацией ООО «Капиталь-СтройПроект», является Торгово-развлекательный комплекс в г. Самаре.

Краткое описание объекта

Торгово-развлекательный комплекс (рис. 1) построен в Куйбышевском районе г. Самары на территории 6 квартала жилого района «Волгарь». Участок торгово-развлекательного комплекса с северо-запада ограничен Народной улицей, с юга – улицей Академика Тихомирова, а с востока – улицей Осетинской. На первых трех этажах блоков расположены рестораны и кинозалы, в подвале расположен паркинг на 208 автомашин и технические помещения.



Рис.1. Общий вид торгово-развлекательного комплекса в г. Самаре
Figure. 1 General view of the shopping Mall in the city of Samara

Торгово-развлекательный комплекс представляет собой 4-этажное каркасно-блочное здание с общим подвалом. Конструктивно состоит из шести блоков, каждый из которых представляет собой 4-этажный объем с подвалом. Блоки размещены на фундаментной ж/бетонной плите (рис. 2) толщиной 0,6 м. Размер торгово-развлекательного комплекса в плане: 164×73 м.

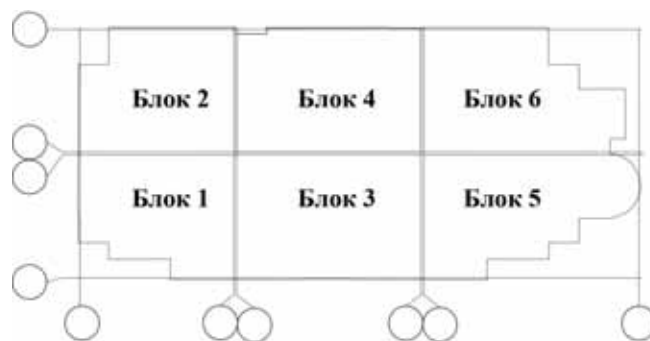


Рис. 2. Схема расположения блоков торгово-развлекательного комплекса
Fig. 2. A scheme of the shopping Mall blocks location

Каждый блок комплекса каркасной конструкции, выполнен из монолитного железобетона. Пространственная жесткость блоков обеспечивается совместной работой колонн, плит перекрытий, лифтовых шахт и фундаментной плиты. Колонны передают нагрузку на железобетонную фундаментную плиту на естественном основании.

Фундаментная плита под торгово-развлекательным комплексом разрезана деформационными швами на 6 частей по числу блоков. Она расположена на бетонной подготовке толщиной 0,1 м и слое гравия толщиной 0,5 м, под которыми находится грунт естественного сложения, представленный до глубины 20 м переслаивающимися суглинистыми, глинистыми и песчаными грунтами.

Инженерно-геологические условия

В геоморфологическом отношении участок с построенным торгово-развлекательным комплексом располагается в пределах I надпойменной террасы р. Самары на отметках 30,2–32,3 м. Инженерно-геологические изыскания территории строительства комплекса выполнила ООО «Самарская геодезическая компания». В результате бурения 13 скважин глубиной до 22,0 м с отбором образцов грунта и последующими лабораторными исследованиями, под почвенно-растительными и насыпными грунтами были выделены три ИГЭ: суглинки мягкопластичные (ИГЭ–3) толщиной слоя от 8,7 до 15,0 м; песок мелкий (ИГЭ–4) толщиной слоя 3,7 – 5,5 м; глина тугопластичная (ИГЭ–5) толщиной слоя от 1,5 до 5,2 м. Прочностные характеристики суглинков и глин при инженерных изысканиях не были исследованы методом зондирования, а были приняты по таблице СП 22.13330.2016. Расчетные значения прочностных и деформационных характеристик, выделенных ИГЭ приведены в таблице 1.

Таблица 1

Расчетные значения прочностных и деформационных характеристик грунтов

Table 1

Design values of strength and strain soil characteristics

№ ИГЭ	Вид грунта	R_p , г/см ³	c_p , кПа	φ_p , град	E , МПа
ИГЭ-3	Суглинок мягкопластичный	2,0	18	10	10
ИГЭ-4	Песок мелкий	2,01	33	0	28
ИГЭ-5	Глина тугопластичная	1,95	14	32	13

Строительство и геодезический мониторинг сооружений комплекса

Строительство торгово-развлекательного комплекса началось в 2020 году и завершилось в 2023 году. Технический мониторинг с инструментальными геодезическими наблюдениями за состоянием конструкций в период строительства, начиная с 2021 г., регулярно проводили ООО «Спецстройтехнология» и ООО «КапитальСтройПроект». Наблюдения показали, что уже через год с начала строительства четыре из шести плитных фундаментов получили деформации (относительная разность осадок фундаментов под блоками № 1, 2, 4 и 6 превышала предельное значение, установленное строительными нормами: $(\Delta s/L)_{\text{н}} = 0,003$). В фундаментной плите между блоками нарушились деформационные швы. Например, раскрытие деформационного шва на стыке между блоками № 6 и № 5 увеличилось и достигло 182 мм (рис. 3). В результате произошли крены блоков, а в несущих ж/бетонных конструкциях, например, блока № 6, образовались трещины (рис. 4).



Рис. 3. Раскрытие деформационного шва на стыке между блоками № 6 и № 5.
а) Замер раскрытия шва. б) Общий вид раскрытия шва между блоками

Fig. 3. Opening of the deformation joint between blocks no. 6 and 5
a) Measurement of the opening. b) The view of the opening

Для выявления причин полученных сверхнормативных деформаций, уточнения инженерно-геологических условий и характеристик грунтов, залегающих под фундаментами, фирмой «НПО ГЕОЦЕНТР» были выполнены дополнительные исследования, в том числе полевые, включая динамическое зондирование, которые показали, что модуль деформации мягкопластичных суглинков (ИГЭ–3) составляет не 10 МПа, а 2 МПа.

Таким образом, причиной образования неравномерных осадок фундаментов блоков стали слабые суглинки, залегающие в их основаниях, которые были выделены как текуче-чепластичные и мягкопластичные.



Рис. 4. Трещина в ж/б конструкции блока № 6
Fig. 4. A crack in the reinforced concrete structure of the block 6

В результате дополнительных изысканий было установлено, что начало строительства торгово-развлекательного комплекса на слабых грунтах без предварительного их укрепления было, безусловно, ошибочным решением, которое и привело к неравномерным осадкам фундаментов, начавшим проявляться до завершения строительства, то есть еще до приложения расчетных нагрузок на фундаменты.

Величина возможных усредненных осадок, если бы не были приняты меры по укреплению слабых грунтов основания, по расчету, выполненному на грунтах с уточненными их физико-механическими свойствами, составили бы:

- для блока № 1 – 22,83 см;
- для блока № 2 – 24,72 см;
- для блока № 3 – 22,13 см;
- для блока № 4 – 24,49 см;
- для блока № 5 – 24,25 см;
- для блока № 6 – 25,18 см.

Осадки блоков превысили бы нормативные значения, установленные СП 22.13330.2016, равные 15,0 см, приблизительно в 1,5 раза.

Проектное решение по укреплению грунтов («ГЕОСТРОЙПРОЕКТ»)

Для прекращения осадок и обеспечения эксплуатационной надежности торгово-развлекательного комплекса заказчиком было принято решение выполнить усиление грунтов основания фундаментов, одновременно не прекращая продолжающегося строительства комплекса, для чего фирма «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ» разработала проект по укреплению грунтов в основании строящегося торгово-развлекательного комплекса.

По проекту под фундаментами шести блоков предусматривалось укрепление грунтов (текучепластичных и мягкопластичных суглинков) путем компенсационного нагнетания цементного раствора по гидроразрывной технологии. Для этого в фундаментной плите с шагом 2,5 м пробуриваются скважины, в которые вертикально устанавливаются инъекторы длиной 8 м. В результате под зданием на глубину 7 м должен быть создан сплошной уплотненный массив грунта повышенной несущей способности с увеличенным модулем деформации до 15 Мпа (рис. 5).

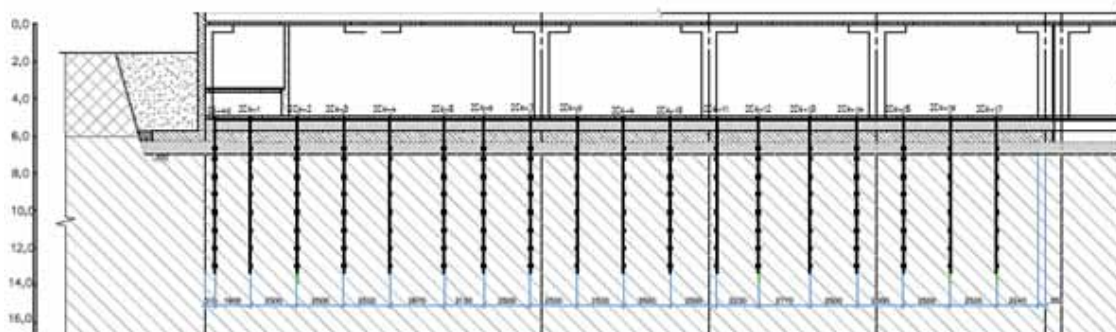


Рис. 5. Расположение инъекционных скважин под фундаментной плитой блока № 1
Fig. 5. Location of the injection boreholes under the foundation slab of the block no. 1

Уплотнение грунтов по проекту предусматривалось проводить инъекцией слабо концентрированного цементного раствора ($v/c=2,9$) с добавкой бентонитовой глины.

Основные положения способа компенсационного нагнетания

Одним из достоинств усиления грунтов способом компенсационного нагнетания цементных растворов по гидроразрывной технологии является техническая простота, не требующая сложного оборудования, а применяемые растворы экологически безопасны для окружающей среды.

Сущность способа состоит в нагнетании через скважины цементных или других твердеющих растворов в грунт под высоким давлением, вызывающем в грунте разрывы, по которым раствор, перемещаясь под давлением на заданное расчетное расстояние, воздействует механически на грунт, изменяя его напряженно-деформированное состояние (НДС), повышая его прочностные свойства, а после твердения раствора прочный материал в разрывах дополнительно армирует массив.

Разрывы, заполненные твердеющим материалом, имеют небольшое сечение (толщину и ширину). Разрывы, как правило, образуются перпендикулярно наименьшему главному напряжению [4], как показано на рис. 6. В начальный период инъекции для нормально консолидированных грунтов образуются вертикальные и наклонные разрывы, направленные по пути наименьшего сопротивления к поверхности грунта.

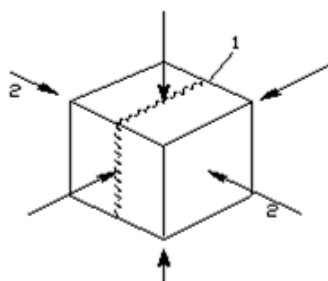


Рис. 6. Направление гидроразрыва в грунте: 1 – плоскость разрыва; 2 – наименьшее главное напряжение
Fig. 6. Direction of hydraulic fracturing in soil: 1 – fracture plane; 2 – the smallest principal stress

Известно, что гидроразрыв при инъекции наблюдается в случаях, когда применяются растворы грубодисперсного состава, включая цементные, глиноцементные и другие, неспо-

собные проникать в поры грунта и пропитывать их. В слабоводопроницаемых грунтах (суглинках, глинах) гидроразрывы образуются при инъекции также и химических растворов.

При многократной повторной инъекции в одну и ту же зону по глубине изменяются главные напряжения, в результате на этом участке возникают горизонтально направленные гидроразрывы, что было подтверждено исследованиями кернового материала при строительстве противофильтрационной завесы глубиной 170 м в основании Асуанской плотины [4, 8]. Для переуплотнённых грунтов сразу могут образовываться горизонтально направленные гидроразрывы [9]. В случае наличия разных слоев грунта, гидроразрывы проходят по границе между слоями (рис. 7).

При инъекции в грунт твердеющего раствора с гидроразрывом происходят параллельно два процесса:

- заполнение пор грунта за счет фильтрации в них твердеющего раствора;
- образование разрывов в грунте и заполнение их твердеющим раствором.

Первый процесс можно рассматривать как образование дополнительных связей между частицами грунта и, как следствие, придание ему более прочной структуры, второй – как задание локального расширяющего плоскость разрыва перемещения, которое приводит к изменению НДС грунта.

Какой процесс преобладает при инъекции будет зависеть от:

- гранулометрического состава и вида грунта;
- скорости подачи (расхода) раствора и давления нагнетания;
- объема нагнетаемого раствора;
- вида нагнетаемого раствора.



Рис. 7. Линза цементного раствора на границе слоев [10]
Fig. 7. Lens of grout at the layers contact [10]

В результате разрывов и образования цементных линз происходит некоторое уплотнение грунта. Этот эффект наблюдается в основном у границ разрывов, а в середине между линзами может быть практически не заметен. Уплотнение в процессе образования линз резко снижается с удалением от скважины и с увеличением между разрывами.

Наибольший эффект по способу компенсационного нагнетания по гидроразрывной технологии достигается в слабых глинистых грунтах при использовании вязких растворов, которые не могут пропитать грунт. Как показывает практика, модуль деформации слабых грунтов, например, с показателем менее 10 МПа после цементации по гидроразрывной технологии повышается почти вдвое [6, 7].

Выполнение инъекционных работ по проекту «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ»

Работы по усилению грунтов по проекту ООО «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ» были начаты в июне 2021 года одновременно на блоках № 1 и № 6, получивших наибольшие неравномерные осадки, и были завершены, включая и остальные блоки, в ноябре 2021 г.

Согласно проекту, укрепительные работы на каждом блоке проводились последовательно в три очереди. В первую очередь выполняли барьерные однорядные экраны в грунте на глубину 7 м по наружному периметру каждого блока. Во вторую – производили под фундаментами блоков цементацию слоя гравия толщиной 0,5 м. В последнюю, третью очередь, производили укрепление грунтов под фундаментами блоков на глубину до 7 м инъекцией через скважины цементного раствора.

Для закрепления щебеночного слоя в контактной зоне под фундаментами и для устройства обоймы в инъекционных скважинах с манжетными инъекторами применяли (согласно проектной документации) слабо концентрированный цементный раствор (в/ц=2,9) одинакового состава (на 1 м³ раствора): портландцемент М500 – 300 кг, бентонит – 60 кг, вода – 0,875 м³. Плотность раствора 1,23 т/м³, прочность 0,5 МПа.

Инъекцию грунтов в основании блоков производили последовательно через одни и те же скважины $\varnothing 118$ мм, пробуренные в фундаментной плите с помощью алмазного сверления. Скважину в грунте на глубину 7 м бурили вращательным методом с применением шнеков $\varnothing 90$ мм (рис. 8).



Рис. 8. Бурение в грунте скважины $\varnothing 90$ мм полым шнеком
Fig. 8. Drilling of the 90 mm in diameter borehole with a hollow auger

К инъекции цементного раствора через скважины приступали через двое суток после твердения обоймы. В каждую скважину прокачивали в грунт по 4,2 м³ цементного раствора под давлением до 0,5 МПа. Начинали инъекцию в скважине через нижний манжет, далее через каждый манжет прокачивали по 0,6 м³ цементного раствора.

В конце октября 2022 г. инъекционные работы под всеми шестью блоками торгово-развлекательного комплекса были выполнены. Объем выполненных работ под каждым блоком, соответствующий проектным указаниям ООО «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ», представлены в таблице 2.

Таблица 2

Объем выполненных работ по блокам

Table 2

A scope of executed works per block

Блок №	Скважина инъекционная			Расход цементного раствора, м³		
	глубина, м	количество, шт.	количество, манжет, шт.	в манжет	в скважину	под блок
1	7	248	1 736	0,6	4,2	1 041,6
2	7	282	1 974	0,6	4,2	1 184,4
3	7	332	2 324	0,6	4,2	1 394,4
4	7	362	2 534	0,6	4,2	1 520,4
5	7-8	296	2 368	0,6	4,2	1 598,4
6	7	342	2 394	0,6	4,2	1 436,4
Итого		1 862	13 330	-	-	8 175,6

Как показали инструментальные геодезические наблюдения, ожидаемая стабилизация осадок фундаментов торгово-развлекательного комплекса после завершения инъекционных работ по проекту ООО «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ» не произошла, осадки фундаментов не прекратились (рис. 9). В связи с этим Заказчиком было принято решение продолжить работы по укреплению грунтов под торгово-развлекательным комплексом по новому проекту, разработанному ООО «ГОРПРОЕКТ-1».

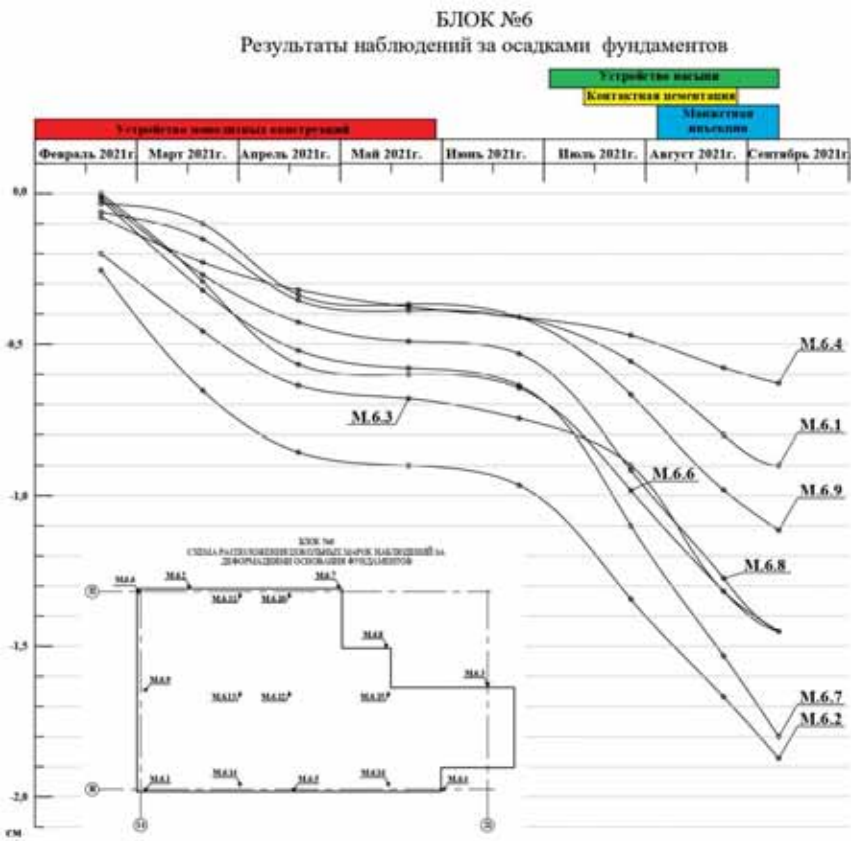


Рис. 9. Результаты наблюдений за осадками фундаментов блока № 6
Fig. 9. Monitoring results of the foundation settlement of the block 6

Проектное решение по укреплению грунтов (ООО «ГОРПРОЕКТ-1»)

В проекте ООО «ГОРПРОЕКТ-1» за основу были приняты размеры и объем укрепляемого массива грунта, какими были и в проекте ООО «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ» – под всей площадью фундаментов торгово-развлекательного комплекса на глубину 7 м, с усилением модуля деформации слабого грунта с 2 МПа до 15 МПа.

Существенные изменения в проекте внесены по составу, свойствам и расходу цементного раствора для укрепления массива грунтов в основании торгово-развлекательного комплекса. Увеличено количество инъекционных скважин, а также усилен режим инъекции закрепляющего раствора в грунт под повышенным давлением до 2 МПа.

Усиление грунтов в основании блоков было предусмотрено проводить высококонцентрированным цементно-бentonитовым раствором следующего состава (В/Ц=0,57):

- портландцемент М500 – 1127 кг;
- вода – 642 л;
- бентонит – 120 кг;
- ускоритель схватывания (кальций хлористый) – 25 кг.

В соответствии с проектом плотность раствора должна была составить $\gamma=1,77$ т/м³, прочность затвердевшего раствора – 6,5 МПа. В каждую скважину в один прием проектом предписывалось закачивать по 4,2 м³ цементного раствора под давлением 2,0 МПа.

Производство инъекционных работ по проекту ООО «ГОРПРОЕКТ-1»

Работы по усилению грунтов были начаты в декабре 2021 г. с блока № 6, продолжающего получать неравномерные осадки, и завершены под всеми блоками комплекса в ноябре 2022 г. Укрепление грунтов стали производить через инъекторы из стальных труб $\varnothing 32$ мм, погружаемые в грунт с помощью электроперфоратора через скважины в фундаментной плите (рис. 10). Инъекционные скважины располагали рядами равномерно по всей площади каждого блока.

В первую очередь производили инъекцию раствора в рядах снаружи каждого блока для создания однорядного барьерного экрана. Во вторую очередь производили инъекцию раствора в скважины под фундаментами самих блоков. В каждом блоке начинали инъекцию со скважин, расположенных в рядах по периметру блока и продолжали в последующих рядах – к центру блока. В каждом ряду обработку скважины производили через одну и завершали ряды обработкой пропущенных скважин. В каждую скважину закачивали одним циклом по 4,2 м³ цементного раствора под давлением 2,0 МПа.

В грунты основания торгово-развлекательного комплекса было закачено по проекту ООО «ГОРПРОЕКТ-1» 8511 м³ концентрированного цементного раствора. Количество инъекционных скважин и объемы цементного раствора, израсходованные для укрепления грунтов под каждым блоком, представлены в таблице 3.

Проводимые инструментальные геодезические наблюдения в период производства и после окончания работ по проекту ООО «ГОРПРОЕКТ-1» показали положительные результаты – осадки фундаментов блоков торгово-развлекательного комплекса прекратились. Прочностные и деформационные характеристики грунтов в основании плитных фундаментов повысились. Так, модуль деформации слабых суглинистых грунтов увеличился с 2–10 МПа до 18–20 МПа, тем самым, установленное проектом требование в 15 МПа оказалось превышенным.



Рис. 10. Забивка иньектора
Fig. 10. Injector driving

Количество скважин и объемы цементного раствора,
израсходованные для укрепления грунтов по блокам

Таблица 3

Table 3

The number of boreholes and volume of strengthening grout
per block

Блок №	Скважина инъекционная		Расход цементного раствора, м³	
	глубина, м	количество, шт.	в скважину	под блок
1	7	424	4,2	347
2	7	416	4,2	1184,4
3	7	442	4,2	1394,4
4	7	456	4,2	1520,4
5	7	462	4,2	1598,4
6	7	586	4,2	2466,0
Итого, м³		2786	-	8511,0

В процессе инъекционных работ проявилась тенденция к выравниванию фундаментных плит с подъемом отдельных участков на ряде блоков до 20 см. На рис. 11 представлена динамика подъема фундаментной плиты блока № 6, претерпевшего наибольшие осадки. В целом относительная разность осадок плитных фундаментов под блоками торгово-развлекательного комплекса снизилась $\epsilon=0,00356 \div 0,0109$ до $\Delta s/L < 0,003$.



Рис. 11. Динамика подъема фундаментных плит блока № 6
Fig. 11. Lifting trend of the foundation slabs of the 6 block

Анализ результатов усиления грунтов основания ТРК на объекте в г. Самаре

В результате работ по усилению грунта основания фундаментных плит ТРК в Самаре была зафиксирована стабилизация осадок фундаментов и некоторое выравнивание осадок разных частей фундамента относительно друг друга. Ниже рассмотрим, какие процессы происходили при производстве работ по первому и второму проекту и за счет чего был достигнут требуемый результат.

Как указывалось выше, при инъекции твердеющего раствора с гидроразрывом происходят два процесса: заполнение пор грунта за счет фильтрации в них твердеющего раствора и образование разрывов с заполнением их твердеющим раствором. То есть, физические действия, сопровождающие указанные процессы, это фактически закрепление (связывание частиц), изменение плотности грунта и напряженно-деформированного состояния.

Для того, чтобы в процессе инъекции происходило закрепление, необходим состав раствора низкой плотности и достаточной для образования цементного камня вязкости. В случае недостаточной вязкости раствор как вода фильтруется в грунт, практически не оставляя следов инъекции. Эта ситуация и сложилась при выполнении работ по проекту фирмы «ГЕОСТРОЙПРОЕКТ». Контрольные исследования не выявили наличия цементного камня в грунте основания и осадка продолжалась даже с большей скоростью, чем при возведении каркаса.

Таким образом, даже при том, что проектом были выбраны оптимальные глубина инъекции и порядок проведения работ, неверно принятый состав инъекционного раствора не позволил добиться положительного результата.

В этой связи закачанный в массив грунта основания на 1-м этапе раствор (8 175,6 м³) практически не сыграл никакой роли и может не рассматриваться в качестве материала, пошедшего на стабилизацию осадок.

Рассмотрим более подробно процессы, происходившие на 2-й стадии выполнения работ по проекту ООО «ГОРПРОЕКТ – 1».

В объем грунта, составляющий 83804 м³, было закачано в общей сложности 8511,0 м³ твердеющего раствора. Однако было бы неверно утверждать, что весь раствор пошел на образование цементного камня. Всегда часть раствора замещает поры, зоны разуплотнения и т.п. Остальная часть раствора также не вся идет на создание цементного камня.

Известно, что общий объем раствора инъекции Q_n зависит от механических и фильтрационных характеристик грунта, а также пористости и наличия пустот в грунте и в общем виде может быть определен следующим образом:

$$Q_n = Q_d + Q_{ф1} + Q_{ф2}, \quad (1)$$

где Q_d – объем раствора, необходимый для создания требуемых объемных деформаций грунта;

$Q_{ф1}$ – объем раствора, заполнившего поры и отдельные пустоты в грунте;

$Q_{ф2}$ – объем раствора, профильтровавшегося за расчетную зону инъекции.

Объем раствора Q_d , необходимый для создания требуемых объемных деформаций грунта ΔV , определяется по следующей формуле:

$$Q_d = 100\Delta V / K_o, \quad (2)$$

K_o – объем цементного камня, образовавшегося после твердения, в процентах от объема раствора, определяется по графику (рис. 12).

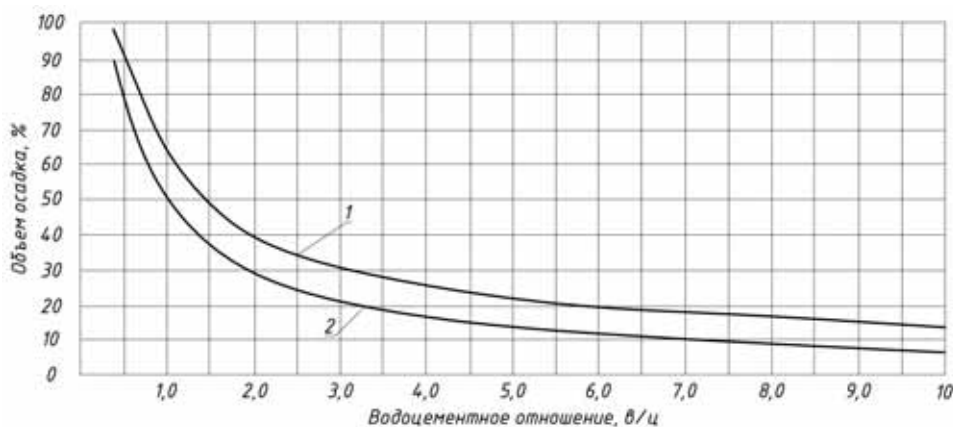


Рис. 12. Зависимость объема выхода цементного камня относительно объема закачанного раствора различного в/ц при выстойке 1. без давления, 2. под давлением [5]

Fig. 12. Volume of the cement stone output in relation to the volume of the pressurized solution of different water/cement ratio at curing 1. without pressure and 2. under pressure [5]

Объем раствора, заполнившего поры $Q_{ф1}$, для каждого вида грунта – величина переменная и зависит, в том числе, от количества циклов нагнетания. Для прикидочных расчётов значение $Q_{ф1}$ в запас примем как для песчаных и гравелистых грунтов по формуле: $Q_{ф1} = kV_{гр} n$, где $V_{гр}$ – объем рассматриваемого грунта, n – пористость, k – коэффициент заполнения грунта цементным раствором, что соответствует примерно 1000 м^3 .

Объем раствора, профильтровавшегося за расчётную зону инъекции $Q_{ф2}$ в рассматриваемом случае минимальный, т.к. инъекционные работы начинались с того, что выполнялась законтуренная обойма, препятствовавшая выносу раствора за зону инъекции, его можно принять порядка 5 % или 425 м^3 . Таким образом, объем раствора Q_d , идущий на создание требуемых объемных деформаций грунта, за вычетом $Q_{ф1}$ и $Q_{ф2}$, составит примерно 7 тыс м^3 .

Из графика на рис. 12 можно видеть, что при В/Ц 2,9 («ГЕОСТРОЙПРОЕКТ») объем раствора, идущего на создание цементного камня, составляет немногим более 20 %, при В/Ц 0,57 (ООО «ГОРПРОЕКТ-1») более 60 % или порядка 4200 м^3 .

Таким образом, инъекционные работы привели к объемному расширению массива грунта порядка 5 % (термин «объемное расширение» взят из программного комплекса Plaxis) от общего объема массива грунта глубиной 7 м под всей площадью здания.

Образовавшиеся многочисленные линзы цементного камня, расположенные в горизонтальной плоскости, во-первых, существенным образом меняют величину σ_1 и соответственно σ_3 , что увеличивает модуль деформации E .

Во-вторых, при небольшом расстоянии между линзами цементного камня уменьшается пористость и увеличивается плотность грунта между линзами, что также приводит к увеличению модуля деформации E (рис. 13).

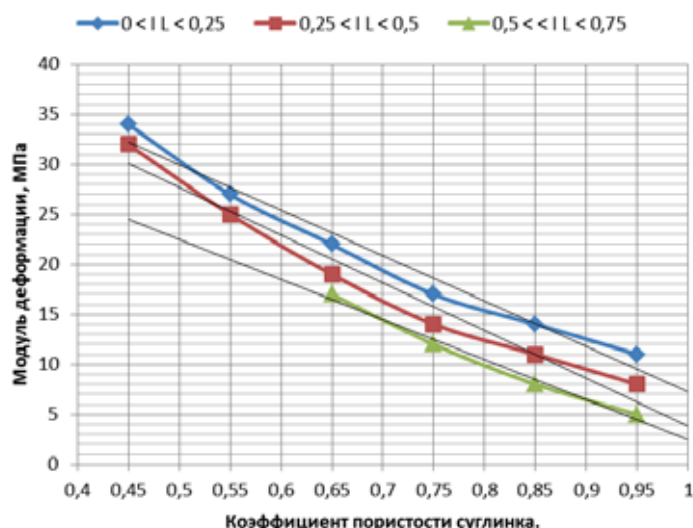


Рис. 13. Модуль деформации полутвердого, тугопластичного и мягкопластичного суглинка в зависимости от коэффициента пористости (СНиП 2.02.01-83*)

Fig. 13. Deformation modulus of stiff, firm and soft loam depending on void ratio (SNiP 2.02.01-83*)

Таким образом, оба процесса, происходившие при инъекции раствора по проекту ООО «ГОРПРОЕКТ-1», приводят к увеличению модуля деформации грунта основания, снижению осадки фундаментов и даже некоторому их подъему.

Заключение

1. На реальном объекте строительства торгово-развлекательного комплекса в городе Самаре доказана эффективность применения усиления грунтов основания, сложенных слабыми грунтами, путем цементации по гидроразрывной технологии (метод компенсационного нагнетания).

2. Усиление грунтов по методу компенсационного нагнетания возможно и эффективно в случае применения цементного раствора высокой концентрации ($v/c=0,57$), обладающего вязкостью, достаточной для образования цементного камня. В случае применения цементного раствора низкой концентрации ($v/c=2,9$) раствор профильтровывается в грунт как вода и цементный камень практически не образуется.

3. При инъекции в грунт твердеющего раствора с гидроразрывом происходят параллельно два процесса:

- заполнение пор грунта за счет фильтрации в них твердеющего раствора;
- образование разрывов в грунте и заполнение их твердеющим раствором (в основном в горизонтальной плоскости).

Первый процесс можно рассматривать как образование дополнительных связей между частицами грунта и, как следствие, придание ему более прочной структуры, второй – как задание локального расширяющего плоскость разрыва перемещения, которое приводит к изменению НДС грунта.

4. Образовавшиеся многочисленные линзы цементного камня, расположенные в горизонтальной плоскости, влияют на увеличение модуля деформации E двумя связанными процессами:

- существенно меняют величину σ_1 и соответственно меняется σ_3 ;
- уменьшается пористость и увеличивается плотность грунта между линзами.

5. Представленные в статье результаты позволяют сделать вывод об эффективности применяемого метода компенсационного нагнетания при снижении осадок фундаментов, подъёме зданий и выправлении их кренов, вызванных сложными геологическими условиями или с ошибками в проектировании и строительстве.

Список литературы

1. СП 22.13330.2011. Основания зданий и сооружений. М.: Росстандарт. 2011. 166 с.
2. Справочник проектировщика. Основания, фундаменты и подземные сооружения. М. 1985. 480 с.
3. Исаев Б.Н. и др. Опыт закрепления грунтов цементогрунтовыми элементами // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2010. № 5. С. 29–32. EDN: SKAOLL
4. Сергеев В.И. Разрывные нарушения в аллювиальных грунтах в процессе инъекции. *Тр. VIII совещания по закреплению, уплотнению грунтов в строительстве*. М. 1974. С. 213–214.
5. Ибрагимов М.Н., Семкин В.В. Закрепление грунтов инъекцией цементных растворов. АСВ, 2012. 254 с. ISBN: 978-5-93093-863-0 EDN: QNPWLR
6. Кулеев М.Т., Марголин В.В. Некоторые особенности разрушения обоймы и характер распространения растворов в песчаных грунтах при методе инъекции через манжетные колонны. *Тр. VШ совещания по закреплению, уплотнению грунтов в строительстве*. М. 1974. С. 203–205.
7. Шулятьев О.А., Ибрагимов М.Н., Мозгачёва О.А., Минаков Д.К. Экспериментальные исследования изменения НДС грунта при устройстве геотехнического барьера // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2014. № 10. С. 88–92. EDN: WZIWZH
8. Кулеев М.Т. и др. Противофильтрационная завеса Асуанской плотины. М.: Энергия, 1970. 183 с.
9. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Мозгачева О.А. Новые способы геотехнического проектирования и строительства. Изд-во АСВ, 2019. 218 с.
10. Петрухин В.П., Шулятьев О.А., Ибрагимов М.Н., Мозгачёва О.А. Способ изменения напряженно-деформированного состояния грунтов основания // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2014. № 10. С. 99–109.
11. Ибрагимов М.Н. Вопросы проектирования и производства уплотнения грунтов инъекцией растворов по гидроразрывной технологии // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2015. № 2. С. 22–27.
12. Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D., Komiya K. Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation Grouting in Clays. *Journal of geotechnical geoenvironmental engineering ASCE*, 2003, vol. 129, pp. 124–132.
13. Soga K., Au S.K.A., Jafari M.R., Bolton M.D. Laboratory investigation of multiple grout injection into clay. *Geotechnique* 54, 2004, no 2, pp. 81–90.

References

1. SP 22.13330.2011. Foundations of Buildings and Structures. Moscow: Rosstandart, 2011, 166 p. (In Russian)
2. Designer's Handbook – Foundations, Underground Structures, and Foundations. Moscow, 1985, 480 p. (In Russian)
3. Isaev B.N. et al. Experience in Soil Stabilization with Cement-Soil Elements. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2010, no. 5, pp. 29–32. (In Russian) EDN: SKAOLL
4. Sergeev V.I. Discontinuities in Alluvial Soils during Injection. *Proceedings of the VIII Conference on Soil Stabilization and Compaction in Construction*. Moscow, 1974, pp. 213–214. (In Russian)
5. Ibragimov M.N., Semkin V.V. Soil Stabilization by Injection of Cement Mortars. ASV, 2012, 254 p. ISBN: 978-5-93093-863-0 EDN: QNPWLR (In Russian)
6. Kuleyev M.T., Margolin V.V. Some Features of Casing Failure and the Nature of Solution Spread in Sandy Soils with the Injection Method through Cuff Columns. *Proceedings of the VIII Conference on Soil Stabilization and Compaction in Construction*. Moscow, 1974, pp. 203–205. (In Russian)
7. Shulyatyev O.A. et al. Experimental Studies of Changes in Soil Stress-Strained State during the Construction of a Geotechnical Barrier. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2014, no. 10, pp. 88–92. (In Russian) EDN: WZIWZH

8. Kuleyev M.T. et al. Anti-seepage Curtain of the Aswan Dam. Moscow: Energia, 1970, 183 p. (In Russian)
9. Petrukhin V.P., Shulyaev O.A., Mozgacheva O.A. New methods of geotechnical design and construction. ASV Publishing House, 2019. 218 p. (In Russian)
10. Petrukhin V.P., Shulyaev O.A., Ibragimov M.N., Mozgacheva O.A., Method for changing the stress-strain state of foundation soils. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*, 2014, no. 10, pp. 99–109. (In Russian)
11. Ibragimov M.N. Issues of design and production of soil compaction by injection of solutions using hydraulic fracturing technology. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 2015, no. 2. pp. 22–27. (In Russian)
12. Au S.K.A., Soga K., Jafari M.R., Bolton M.D., Komiya K. Factors Affecting Long-Term Efficiency of Compensation Grouting in Clays. *Journal of geotechnical geoenvironmental engineering ASCE*, 2003, vol. 129, pp. 124–132.
13. Soga K., Au S.K.A., Jafari M.R., Bolton M.D. Laboratory investigation of multiple grout injection into clay. *Geotechnique* 54, 2004, no 2, pp. 81–90.

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Александрович Шулятьев*, доктор технических наук, заместитель директора НИИОСП им. Н.М. Герсевича по научной работе, заведующий лабораторией освоения подземного пространства городов № 35, доктор технических наук. Москва
niiosp35@yandex.ru

Oleg A. Shulyatyev, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Director for Research, N.M. Gersevanov Research Institute of OSS, Head of the Laboratory for Urban Underground Space Development. Moscow
niiosp35@yandex.ru

Ольга Анатольевна Мозгачева, заместитель заведующего лабораторией освоения подземного пространства городов № 35, НИИОСП им. Н.М. Герсевича. Москва

Olga A. Mozgacheva, Deputy Head of Laboratory no. 35 for Urban Underground Space Development, N.M. Gersevanov Research Institute of OSS. Moscow

Виктор Евгеньевич Мышинский, аспирант НИИОСП им. Н.М. Герсевича, эксперт негосударственной экспертизы проектной документации. Москва

Viktor E. Myshinsky, Graduate Student N.M., Gersevanov Research Institute of OSS. Moscow

Сергей Дмитриевич Ибрагимов, аспирант НИИОСП им. Н.М. Герсевича, генеральный директор геотехнической компании ООО «КапительСтройПроект». Москва

Sergey D. Ibragimov, Graduate Student Gersevanov Research Institute of OSS Director General of the geotechnical company KapitelStroyProekt LLC. Moscow

Вячеслав Валентинович Орехов, доктор технических наук, главный специалист экспертно-аналитического отдела управления по научно-технической и нормативной политике. Москва

Vyacheslav V. Orekhov, Dr. Sci. (Engineering), Chief Specialist of the Expert and Analytical Department of the Scientific, Technical and Regulatory Policy Division.

*Автор, ответственный за переписку / Correspondent author

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ, ИННОВАЦИИ И ПЕРЕДОВЫЕ ПРАКТИКИ В ТОННЕЛЕСТРОЕНИИ

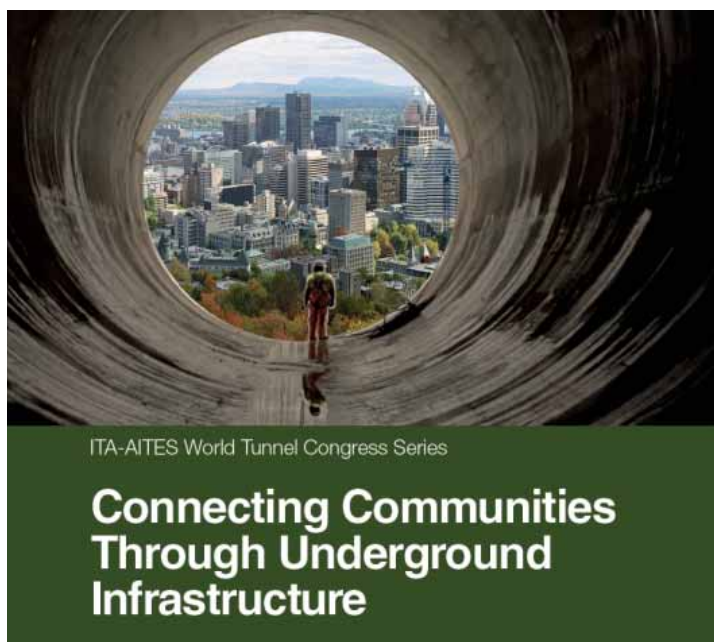
(ПО МАТЕРИАЛАМ МИРОВОГО КОНГРЕССА ITA-AITES 2026, МОНРЕАЛЬ)

Д.С. КОНЮХОВ, д-р техн. наук, профессор

DMITRY S. KONYUKHOV, Dr. Sci. (Engineering), Professor

В.В. КОСМИН, канд. техн. наук, профессор

VLADIMIR V. KOSMIN, Cand. Sci. (Engineering), Professor



Мировой конгресс по тоннелестроению ITA-AITES 2026, состоявшийся в мае 2026 года в Монреале, Канада, стал ключевым событием года для международного сообщества специалистов в области подземного строительства. Тема конгресса «Соединяя сообщества через подземную инфраструктуру» отражает современное представление о роли освоения подземного пространства как стратегического инструмента устойчивого развития городов и регионов.

Сборник трудов конгресса включает почти 700 технических докладов, авторами которых выступили несколько тысяч специалистов из академических, исследовательских и производственных организаций. География проектов охватывает все континенты: в работе приняли участие представители не менее полусотни стран. Сборник организован по пяти ключевым тематическим разделам (рис. 1). Общий объем издания – 5558 с.

В представленном обзоре выделены выявленные на конгрессе главные мировые тенденции: системное освоение подземного пространства, жёсткие требования к экологической устойчивости, тотальная цифровизация, интеллектуализация управления рисками, а также прорывные строительные и эксплуатационные технологии.

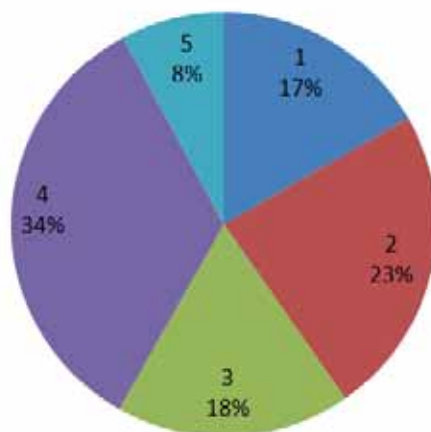


Рис. 1. Распределение докладов по тематике: 1 – Стратегическое планирование и управление подземным пространством; 2 – Геологическая разведка и цифровая интеграция; 3 – Инженерное проектирование и подземные сооружения; 4 – Методы строительства, инновации и реализация проектов; 5 – Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и управление активами

Стратегическое планирование и управление подземным пространством

В разделе раскрывается многоуровневая природа управления подземным строительством: от стратегического видения освоения подземного пространства и градостроительной интеграции до детальных механизмов контрактного управления, распределения рисков и обеспечения устойчивости проектов на всём жизненном цикле. Ключевым вектором развития выступает переход от изолированных проектных решений к комплексным стратегиям: оптимизация геометрии станций метрополитена и тоннелей, рациональное совмещение транспортных, коммунальных и энергетических функций в единой подземной инфраструктуре, а также учёт ограничений плотной городской застройки, исторической среды и действующих инженерных сетей. В докладах прослеживается стремление к максимальной эффективности использования подземного объёма, в том числе через многоярусные решения, оптимизацию компоновки внутренних конструкций и применение 3D-моделей взаимодействия с грунтовым основанием.

Значительное внимание уделено вопросам устойчивого развития и низкоуглеродного проектирования. Представлены как технологические, так и управленческие инструменты снижения углеродного следа: применение бесцементных бетонов и фибросегментов, повторное использование материалов проходки (включая переработку породы в песок и применение шламов в тампонажных растворах), пассивный захват углерода с помощью специальных заполнителей в набрызг-бетоне, а также системный учёт «встроенного» углерода на ранних стадиях проектирования. Особую роль играет цифровизация оценки устойчивости: интеграция BIM и оценки жизненного цикла (ЖЦ) позволяют количественно сопоставлять варианты проектных решений по критериям ресурсоэффективности и экологической нагрузки.

Блок докладов, посвящённый управлению рисками и неопределённостями, отражает зрелость современных подходов к геотехническому риск-менеджменту. В докладах последовательно раскрывается практика применения вероятностных оценок воздействия на критическую инфраструктуру, подтвержденных методик распределения геологических рисков между сторонами контракта, использования базовых геотехнических отчётов и прогрессивных моделей реализации. Важной тенденцией является переход от «реактивного» к «проактивному» управлению: раннее выявление препятствий, объединение полевых исследований с прогнозным моделированием и применение механизмов поэтапного подтверждения проектных параметров по мере раскрытия выработки.

Контрактные модели и практики управления проектами рассматриваются как самостоятельный инструмент извлечения информации и повышения эффективности. В докладах анализируются различные схемы реализации – от договоров подряда «под ключ» и схем сотрудничества до современных партнёрских механизмов, позволяющих гибко выстраивать взаимодействие сторон в условиях высокой неопределённости подземных работ. Особое место занимают вопросы формирования достоверных стоимостных оценок с учётом неопределённостей, структурирования обязательств «под задачу», а также согласования интересов заказчика, подрядчика и вовлеченных сторон в условиях сжатых сроков и регуляторного давления.

Отдельный пласт тематики раздела связан с социальной устойчивостью, вовлеченностью и развитием кадрового потенциала отрасли. В докладах поднимаются вопросы преодоления социального сопротивления крупным проектам, территориального согласования и вовлечения местных сообществ. Параллельно раскрываются инициативы по повышению разнообразия и удержанию кадров, роли молодёжных сообществ в продвижении устойчивых практик, а также формированию культуры безопасности и принадлежности в традиционно «закрытых» сегментах отрасли.

Из входящих в раздел 112 докладов **прикладные вопросы**: описание реализованных проектов, кейсы планирования и строительства, результаты внедрения управленческих и технологических решений на конкретных объектах, отражены в 54 докладах (48 %), где рассматриваются материалы по проектам, примеры оптимизации компоновки станций и тоннелей, кейсы по управлению отходами проходки и повторному использованию материалов, а также практические результаты применения бесцементных составов, систем пассивного захвата углерода и цифровых инструментов оценки устойчивости (рис. 2а).

Методические вопросы: разработка инструментов, критериев и процедур оценки, подходов к моделированию, риск-менеджменту и контрактному управлению рассматриваются в 39 докладах (35 %). Описываются работы по вероятностным и надёжным методам оценки воздействия на городскую инфраструктуру, методикам распределения геологических рисков, применению геотехнических отчетов и прогрессивных схем реализации, подходам к формированию стоимостных оценок с учётом неопределённости, а также процедурам интеграции полевых данных и прогнозного моделирования.

Теоретические вопросы: развитие концептуальных моделей, фундаментальные исследования в области оценки устойчивости, управления рисками и контрактных отношений рассматриваются в 19 докладах (17 %), отражающих исследования по методологии оценки углеродного следа, развитию подходов к объединениям ВІМ и ЖЦ, концепту-

альным моделям управления неопределённостью в подземных проектах, а также фундаментальные работы по оценке рисков специфических явлений: горных ударов, прорывов воды и эффективности защитных мероприятий.

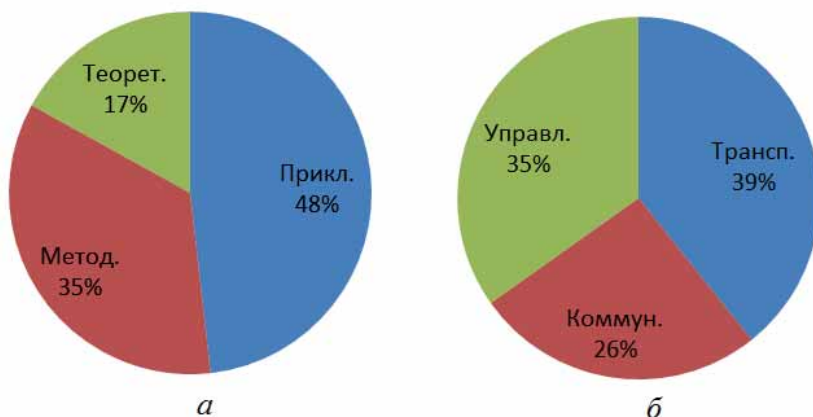


Рис. 2. Распределение докладов в разделе «Стратегическое планирование и управление подземным пространством»: *а* – по направленности; *б* – по отраслям

Транспортная тематика: метрополитены, городские железные дороги, транспортные тоннели и пересадочные узлы представлена в 44 докладах (39 %): от трассировки линий и компоновки станций в стеснённых условиях до оценки влияния строительства на действующие линии и оптимизации проходки в городской среде (рис. 2б).

Коммунальная, энергетическая, гидротехническая и специальная инфраструктура: дренажные и водоотводные тоннели, водоводы, объекты энергетики, хранилища, научные установки и иные специализированные подземные сооружения) отражена в 29 докладах (26 %). Это проекты водообеспечения и водоотведения, тоннелей для энергетических объектов, подземелий для хранения, а также инженерные решения для крупных подземных объектов специального назначения, включая объекты ядерной энергетики и научные обсерватории.

Управление, контрактные практики, риск-менеджмент и сквозные организационные вопросы, включая страхование, распределение рисков, взаимодействие сторон, социальные аспекты и вовлеченность рассматриваются в 39 докладах (35 %), отражая тематику контрактных моделей и методов реализации, распределения геологических и технологических рисков, формирования стоимостных оценок, а также социальные и кадровые практики, направленные на повышение устойчивости и вовлеченности отрасли.

Геологическая разведка и цифровая интеграция

В докладах этого раздела отражена эволюция подходов к изучению подземного пространства и управлению данными в тоннелестроении: от точечных полевых методов – к интегрированным цифровым процессам, объединяющим изыскания, мониторинг и прогнозную аналитику. Ключевой вектор развития – переход от разрозненных измерений к единой информационной картине состояния массива и конструкций, где достоверность исходных данных, их непрерывное обновление и интеллектуальная обработка выступают как основа для обоснованных инженерных решений. В материалах последовательно про-

слеживается логика «от данных – к действию»: сначала формируется максимально полная характеристика площадки (включая неоднородности, зоны риска и прогнозные модели), затем обеспечивается контроль изменений в реальном времени, а далее – поддержка принятия решений с помощью цифровых и ИИ-инструментов, адаптированных под специфику конкретных условий и стадий проекта.

Значительное внимание уделено совершенствованию методов полевой и дистанционной георазведки, позволяющих заранее выявлять критические особенности массива. Представлены как классические, так и инновационные подходы: алмазное колонковое бурение с комплексным тестированием керна, телеметрия в скважинах, сейсмические методы, электроразведка с оптимизацией алгоритмов поиска, анализ волновых полей от взрывов для моделирования реакции массива, а также комбинирование двух сейсмических методов для повышения надёжности прогноза. Практические описания охватывают широкий спектр объектов – от крупных гидротехнических проектов и научных установок (будущий новый коллайдер CERN) до городских транспортных тоннелей и коллекторов, где точность прогноза напрямую влияет на безопасность и стоимость строительства. Важной тенденцией просматривается переход от «усреднённых» оценок к детализированным моделям, учитывающим историю напряжений, анизотропию, шероховатость трещин и локальные зоны ослабления, что позволяет точнее прогнозировать устойчивость выработок и поведение обделок.

Блок докладов, посвящённый инструментальному мониторингу и дистанционному зондированию, отражает зрелость современных практик контроля деформаций и взаимодействия строительства с существующей инфраструктурой. В материалах раскрываются технологии, обеспечивающие непрерывную фиксацию изменений: волоконно-оптические системы для оценки напряжений в крепи, 3D-сканирование для контроля качества и деформаций, спутниковая интерферометрия (InSAR) для мониторинга оседаний поверхности, тепловизионные методы для оценки остаточных усилий в анкерах, а также специализированные системы контроля параметров проходки (качество пены, состояние уплотнений, объёмы извлекаемого грунта). Особое место занимают решения для городской среды, где критически важно минимизировать влияние на соседние объекты: динамический контроль воздействия на действующие линии метро, оценка эффективности мер по ограничению деформаций (включая раннее замыкание контура), а также мониторинг сложных геотехнических взаимодействий (например, проходка под виадуками и склонами). Практические примеры охватывают проекты в ряде стран, демонстрируя адаптацию технологий под разные условия и требования.

В отношении применения ИИ и машинного обучения доклады последовательно раскрывают переход от автоматизации рутинных операций к прогнозной аналитике и поддержке принятия решений. Представлены различные модели для прогноза осадок, деформаций, производительности щитов, классификации пород и оценки рисков. Важной особенностью является акцент на воспроизводимости и прозрачности результатов: применяются методы интерпретации, уделяется внимание очистке и проверке данных, а также проверке обобщающей способности моделей на разных проектах. Рассматриваемые практические задачи охватывают широкий спектр сценариев – от автоматической идентификации анкеров и классификации пород по гиперспектральным снимкам до прогноза вывалов и оценки влияния проходки на гидрогеологические условия. При этом ИИ рассматривается не как замена при выработке инженерного суждения, а как инструмент, усиливающий экспертизу посредством обработки больших массивов разнородных данных.

Отдельный пласт тематики докладов связан с цифровыми и информационными технологиями, обеспечивающими системную интеграцию данных на всех стадиях ЖЦ объекта. В докладах раскрываются практики применения BIM и параметрического проектирования, создания цифровых двойников, формирования отраслевых баз данных (в том числе по стоимости строительства и параметрам проходки), а также разработки специализированных платформ для управления информацией. Особое внимание уделяется стандартизации и совместимости: формированию единых профилей данных, атрибутов моделей и регламентов работы с информацией, что особенно важно при модернизации существующей инфраструктуры и взаимодействии множества подрядчиков. Дополнительно представлены решения для обучения и передачи знаний – VR-тренажёры, модели набрызг-бетона, мобильные приложения с элементами ИИ, которые повышают качество контроля и снижают риски ошибок посредством отработки нештатных ситуаций и автоматизации фиксации дефектов.

Из 122 докладов, входящих в этот раздел, **прикладные материалы**: описание реализованных проектов, кейсы применения технологий, результаты внедрения на конкретных объектах содержатся в 57 докладах (47 %). Это доклады по конкретным объектам, демонстрирующие применение сейсмических прогнозов, волоконной оптики, InSAR и систем контроля параметров проходки.

Методические работы: разработка инструментов, критериев и процедур оценки, подходов к моделированию, риск-менеджменту и интеграции данных рассмотрены в 40 докладах (33 %): это исследования по проверке прогнозных моделей, интерпретации данных, оптимизации алгоритмов, стандартизации форматов и регламентов, а также методики оценки неопределённостей и контролю расчётных параметров по фактическим данным.

Теоретические и концептуальные работы: развитие фундаментальных подходов к анализу поведения массива, оценке рисков и цифровой трансформации отрасли описывают 25 докладов (20 %), включая исследования по влиянию истории напряжений, моделированию сжимающегося грунта, разработке интерпретируемых моделей ИИ и концепциям «умной подземной инфраструктуры» (рис. 3а).

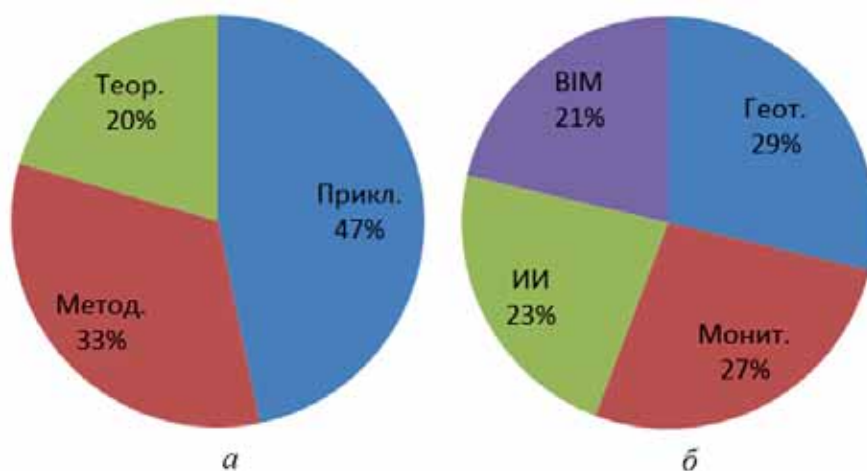


Рис. 3. Распределение докладов в разделе «Геологическая разведка и цифровая интеграция»: а – по направленности; б – по отраслям

По предметной направленности материалы распределяются следующим образом (рис. 3б).

Геотехнические изыскания, характеристика массива и прогноз геологических условий – 35 докладов (29 %), это бурение, сейсмика, электроразведка, анализ керна, обрательные расчёты и комбинированные методы прогноза.

Инструментальный мониторинг, дистанционное зондирование и контроль качества – 33 доклада (27 %), включая волоконную оптику, 3D-сканирование, InSAR, тепловизионные методы и системы контроля параметров проходки.

Применение ИИ, машинного обучения и прогнозной аналитики – 28 докладов (23 %), отражающих разработку и внедрение моделей для классификации, прогноза деформаций, оценки рисков и автоматизации диагностики.

Цифровые технологии, BIM, параметрическое проектирование, управление данными и образовательные инструменты – 26 докладов (21 %), охватывающих практики информационного моделирования, создания цифровых двойников, стандартизации данных и применения VR/AR для обучения.

Таким образом, представленные в рассматриваемом разделе доклады формируют целостную картину современного этапа развития подземного строительства, где ключевым фактором успеха становится не отдельная технология, а способность интегрировать данные и процессы на всём жизненном цикле объекта. Сочетание достоверной георазведки, непрерывного мониторинга, интеллектуальной обработки информации и стандартизированных цифровых практик позволяет снижать неопределённость, повышать предсказуемость результатов и обеспечивать надёжность и экономическую эффективность даже в самых сложных условиях: от плотной городской застройки до уникальных научных и гидротехнических проектов.

Транспортная направленность в этом разделе фактически служит основным контекстом для большинства докладов: практически все технологии и методики рассматриваются через призму тоннелестроения для транспортных объектов – метрополитенов, трамвайных и железнодорожных линий, автодорожных и коммунальных тоннелей, а также крупных пересадочных и инфраструктурных узлов. Транспортные тоннели и метрополитены отражаются примерно в 45–50 % докладов (примерно 55–60 докладов). Это кейсы по метро и трамвайным линиям, тоннелям для железных и автодорог, а также работы, где методы описаны и протестированы именно на транспортных объектах (мониторинг, прогноз, контроль качества при проходке щитами, управление рисками в плотной городской застройке). Гидротехнические, энергетические и научные объекты отражены примерно в 25–30 % (30–35 докладов). Коммунально-инженерные и специальные тоннели (дренаж, водоотвод, технические коридоры и т. п.) – около 15 % (18 докладов), где упор сделан на контроль деформаций в слабых и неоднородных грунтах, управление водопитоками, прогнозирование вывалов и трещин. Общие методы и технологии (методики, алгоритмы, инструменты, подтверждение работоспособности моделей), применимые к любым подземным объектам, рассматриваются примерно в 10 % докладов (12–15 докладов). Это исследования по ИИ, сейсмике, электроразведке, интерпретации данных, стандартизации и т. д., которые не привязаны к одному типу объекта, но активно используются в том числе и в транспортных проектах.

Инженерное проектирование и подземные сооружения

В докладах раздела рассматривается комплекс инженерно-технических решений по обеспечению устойчивости и надёжности подземных сооружений — от выбора материа-

лов и расчёта крепи до управления водопритоками, замораживания грунтов и возведения крупных камер и шахт. Ключевым вектором выступает переход от типовых схем к адаптивным, многопараметрическим проектным решениям: учёт реальной неоднородности массива, динамики деформаций, термогидромеханических эффектов и фактических условий площадки, а также обязательное подтверждение расчётных предпосылок данными мониторинга и обратными расчётами. В докладах отражается стремление к балансу между несущей способностью, технологичностью и устойчивостью: оптимизация толщины обделок и шага анкеровки, применение композитных и фиброармированных материалов, контроль водопритоков и замораживание как инструмент управления рисками, а также широкое использование цифровых методов (3D-моделирование, МКЭ и т.п.) для обоснования конструктивных решений.

Значительное внимание уделено совершенствованию составов и технологий набрызг-бетона: представлены результаты исследований по применению фиброармирования, низкоклинкерных вяжущих и композитных решений, позволяющих повысить трещиностойкость, ускорить набор прочности и снизить углеродный след. Практические аспекты охватывают как подбор добавок и критерии качества (в том числе для влажных смесей), так и оценку огнестойкости, поведения при динамических нагрузках и долговечности в реальных условиях. Рассматриваются вопросы квалификации персонала и контроля качества нанесения: подчёркивается критическая роль обученных операторов и соблюдения технологии для обеспечения проектных характеристик покрытия.

Блок докладов по креплению и обделкам последовательно раскрывает спектр конструктивных подходов – от эмпирических классификаций массива до современных расчётных методик. Представлены рекомендации ИТА по оценке устойчивости забоя, метод расчёта по предельным состояниям с частными коэффициентами, а также практика применения численных моделей для сложных узлов (включая 3D-расчёты примыканий, анализ эксцентриситета обжатия сегментов, работу стыков при сейсмических нагрузках и разжижении грунтов). Важной тенденцией является переход к верифицируемым решениям: нагрузочные испытания опор, оценка энергии разрушения контакта «порода – бетон», исследования поведения систем при анизотропных напряжениях и огневых воздействиях. Практические примеры в докладах демонстрируют применение этих подходов на транспортных объектах, в том числе при строительстве станций и перегонов в плотной городской застройке, где особенно важны точность прогноза и минимизация влияния на поверхность.

Вопросы гидравлики и гидроизоляции рассматриваются как неотъемлемая часть конструктивной безопасности. В докладах последовательно раскрывается цепочка от прогноза водопритоков (в том числе количественной оценки по разломам и моделирования фильтрации при работе щитов) до выбора целевых технологий контроля: предварительное и пост-тампонирование, струйная цементация, инновационные смолы для ремонта под нагрузкой, системы обезвоживания шламов. Особое место занимает гидроизоляция: представлены исследования по поведению листовых мембран, гибридным составам для кольцевого зазора, а также методикам испытаний тампонажных растворов и уплотнений. В сложных условиях эффективным инструментом выступает искусственное замораживание грунтов: доклады содержат как обобщение практики его применения в качестве меры снижения рисков, так и детальные исследования термогидромеханических параметров в различных типах грунтов, включая пылеватые пески и водонасыщенные толщи.

Строительство крупных подземных объектов: шахт, камер, машинных залов и переходных узлов раскрывается в докладах через спектр задач, связанных с контролем масштабных деформаций и обеспечением длительной устойчивости. Представлены решения по анализу выпирания дна выработки, взаимодействию шахты и тоннеля, мониторингу бетонирования в скользящей опалубке, расчёту диафрагменных стен с контролируемым водопонижением. Практические примеры в докладах охватывают широкий спектр объектов: от глубоких станций метрополитена и вентиляционных камер в городах до подземных соединений АЭС, гидроэнергетических туннелей, хранилищ и крупных коммунальных камер. При этом особое внимание уделяется технологиям разработок больших объёмов – точному взрыванию с контролем дробления, применению комбайнов в конкретных геологических формациях, а также мерам по повышению устойчивости обделки к взрывным воздействиям.

Из 120 докладов раздела **прикладные материалы**: описание реализованных проектов, примеры применения технологий, результаты внедрения на конкретных объектах, отражены в 54 докладах (45 %). К ним относятся проекты метрополитенов и городских тоннелей (в том числе Монреаль, Торонто, Окленд, Париж, Стамбул), крупные энергетические и коммунальные объекты, а также материалы по применению тампонирующего, замораживающего, фибробетона и специальных конструктивных решений в реальных условиях (рис. 4а).

Методические работы: разработка инструментов, критериев и процедур оценки, подходов к моделированию, испытаниям и контролю качества рассмотрены в 38 докладах (32 %), это исследования по верификации расчётных моделей, методикам испытаний материалов, оценке термогидромеханических параметров, стандартизации процедур контроля и анализу данных мониторинга.

Теоретические и концептуальные работы: развитие фундаментальных подходов к анализу поведения массива, оценке рисков и устойчивости конструкций, представлены в 28 докладах (23 %), включая исследования по механике контакта «порода – бетон», поведению материалов при экстремальных воздействиях, фундаментальным моделям фильтрации и деформации в сложных грунтовых условиях.

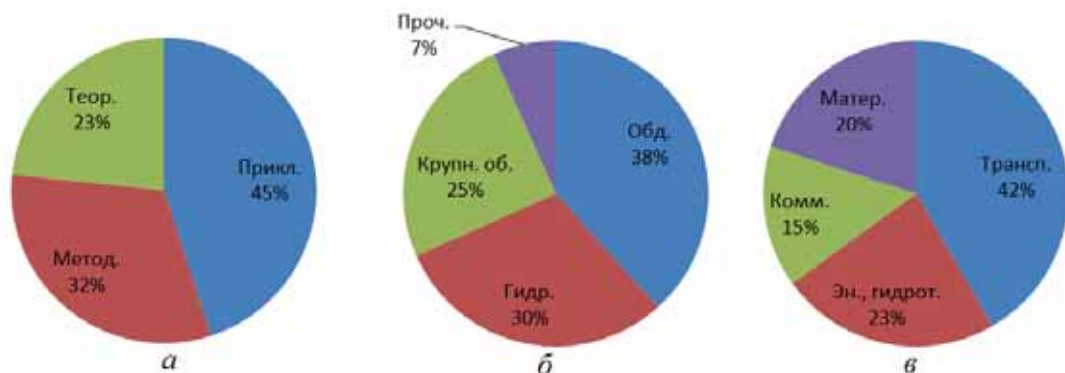


Рис. 4. Распределение докладов в разделе «Инженерное проектирование и подземные сооружения»: а – по направленности; б – по объектам; в – по отраслям

По предметной направленности материалы распределяются следующим образом. Крепление, обделки и анкерные системы (включая набрызг-бетон, фиброармирование,

сегментные обделки, композитные решения и расчётные методы) – 46 докладов (38 %); гидравлика, тампонирующее, гидроизоляция и замораживание, отражая широкий спектр задач по контролю водопритоков, выбору составов и технологий, а также подтверждение их эффективности – 36 докладов (30 %);

строительство и проектирование крупных объектов, демонстрируя разнообразие конструктивных и технологических решений для масштабных выработок (шахты, камеры, машинные залы, сопряжения и станции) – 30 докладов (25 %);

Прочие работы (включая общие методы, междисциплинарные подходы и сквозные технологии) – 8 докладов (7 %) (рис. 4б).

Транспортная тематика: метрополитены, городские и железнодорожные тоннели, станции и пересадочные узлы, рассматривается в 50 докладах (42 %). Это и непосредственно транспортные объекты, и методики, верифицированные на объектах метро и железных дорог (устойчивость забоя, стыки обделки, анкерные решения, гидроизоляция в плотной застройке, контроль осадок и деформаций).

Энергетическая, гидротехническая и специальная инфраструктура: подземные соединения АЭС, гидроэнергетические тоннели, хранилища, водозаборные и дренажные комплексы, отражена в 28 докладах (23 %).

Коммунально-инженерные и городские объекты: канализационные и дренажные тоннели, шахты канализации, крупные камеры для городской инфраструктуры, вентиляционные узлы, рассмотрены в 18 докладах (15 %).

Общие методы, материалы и технологии: моделирование, испытания, классификации, инновации в тампонирующем, замораживании, набрызг-бетоне, применимые к любым подземным объектам, описаны в 24 докладах (20 %) (рис. 4в).

Методы строительства, инновации и реализация проектов

В докладах раздела рассматривается обширный спектр современных подходов к реализации подземных проектов – от выбора оптимальной технологии проходки и адаптации методов к сложным городским и геологическим условиям до внедрения инноваций, повышающих скорость, безопасность и предсказуемость строительства. Ключевым вектором развития декларируется переход от типовых решений к гибким, адаптивным стратегиям: оптимизация последовательности раскрытия выработок, применение предварительного крепления и опережающей крепи, управление деформациями и осадками в стеснённой застройке, а также подтверждение проектных параметров по данным мониторинга в реальном масштабе времени. В докладах прослеживается стремление к повышению технологической зрелости: интеграция цифровых инструментов в управление проходкой, автоматизация ключевых операций, использование данных ТПМК для оперативной корректировки режимов и оценки рисков.

Значительное внимание уделено практическому применению новоавстрийского метода проходки (NATM) и его адаптации к разнообразным условиям – от крупных выработок в слабых грунтах до тоннелей в скальных массивах с аномальными напряжениями. Представлены примеры по проектированию и надзору с опорой на принципы NATM, включая контроль устойчивости забоя, поэтапное крепление, мониторинг сходимости и корректировку параметров крепи по фактическим данным. Практические примеры охватывают как городские транспортные объекты (в том числе линии лёгкого рельсового транспорта и метрополитенов), так и инфраструктурные тоннели различного назначения, демонстри-

руя вариативность применения NATM в зависимости от геологии, плотности застройки и требований к срокам и качеству.

Блок докладов по механизированной проходке последовательно раскрывает опыт применения ТПМК в сложных условиях. Представлены результаты по проходке в неоднородных и слабых грунтах, в зонах разломов и обводнённых толщах, а также в скальных массивах с высокими напряжениями и склонностью к горным ударам. Особое место занимает анализ производительности ТПМК, включая управление давлением на забой, оптимизацию режимов работы ротора и конвейера, снижение риска заклинивания и управление адгезией глинистых грунтов к режущему органу. Практические примеры иллюстрируют решения по запуску и демонтажу ТПМК в стеснённых условиях, проходке вблизи действующих тоннелей и коммуникаций, а также по преодолению геологических аномалий, включая карстовые полости, зоны дробления и газонасыщенные горизонты.

Вопросы микротоннелирования и погружных тоннелей рассматриваются как специализированные решения для плотной городской среды и сложных гидрогеологических условий. В докладах раскрываются технологии продавливания труб, в том числе криволинейного, с контролем сил продавливания и расчётом трения по поверхности, а также методы снижения рисков при проходке в аллювиальных и неоднородных отложениях. Для погружных тоннелей представлены решения по стыковке секций, герметизации швов, проектированию поперечного сечения с учётом волновых и ледовых нагрузок, а также мониторингу деформаций и водонепроницаемости в процессе эксплуатации. Практические примеры охватывают проекты водоводов, коллекторов, транспортных и коммунальных тоннелей, включая первые погружные.

Инновационные разработки и автоматизация представлены как инструменты повышения эффективности и безопасности: от роботизированных систем монтажа обделки и автоматического проектирования буровзрывных работ до цифровых двойников проходки и систем раннего предупреждения о нестабильности забоя. В докладах отражены пилотные проекты по применению автономных транспортных средств для вывоза породы, автоматизированных комплексов набрызг-бетона и анкерного крепления, а также систем мониторинга, интегрированных с BIM и прогнозными моделями. Особое внимание уделено оценке долговечности и огнестойкости конструкций, в том числе применению фибробетона, композитных материалов и специальных гидроизоляционных мембран, позволяющих снизить углеродный след и повысить устойчивость к экстремальным воздействиям.

Вопросы безопасности рассматриваются комплексно: от управления рисками на стадии проектирования до оперативных мер в ходе строительства и эксплуатации. Представлены подходы к анализу сейсмической уязвимости тоннелей в различных грунтовых условиях, проектированию систем дымоудаления и эвакуации, оценке огнестойкости обделок и устойчивости к прогрессирующему обрушению. Доклады практической направленности включают описания модернизации вентиляции и противопожарной защиты в действующих тоннелях, анализ последствий землетрясений и обрушений, а также методы контроля газоопасных сред и работе в условиях повышенного давления. Отдельное внимание уделено человеческим факторам: системам управления безопасностью, культуре безопасности, подготовке персонала и внедрению цифровых инструментов для контроля соблюдения регламентов.

В разделе 228 докладов.

Прикладные: описание реализованных проектов, результаты внедрения технологий на конкретных объектах рассмотрены в 109 докладах (48 %). К ним относятся проекты метро-

политенов, железнодорожных и автодорожных тоннелей, коммунальных коллекторов и гидротехнических туннелей в разных регионах мира (в том числе Монреаль, Торонто, Лиссабон, Стамбул, Дели, Сингапур, Гонконг, Лима), а также материалы по применению NATM, ТПМК, микротоннелирования, погружных тоннелей и специальных методов (замораживание, тампонирующее, предварительное крепление) в реальных условиях. **Методические доклады:** разработка инструментов, критериев и процедур оценки, подходов к моделированию, испытаниям и контролю качества – 68 докладов (30 %). Отражены исследования по верификации расчётных моделей, методикам испытаний материалов, оценке термогидромеханических параметров, стандартизации процедур контроля и анализу данных мониторинга.

Теоретические и концептуальные работы: развитие фундаментальных подходов к анализу устойчивости, безопасности и эффективности строительства, исследования поведения конструкций при динамических и пожарных воздействиях, исследования по фундаментальным моделям фильтрации, трещинообразования и разрушения в сложных грунтовых условиях, включая исследования по механике взаимодействия «машина – грунт» – 51 доклад (22 %) (рис. 5а).

По предметной направленности материалы распределяются следующим образом. Методы проходки и крепление (включая NATM, поэтапную выемку, предварительное крепление, анкерные системы и набрызг-бетон и т. д.) рассмотрены в 80 докладах (35 %), отражая широкий спектр задач по обеспечению устойчивости выработок и управлению деформациями в разных типах грунтов. Механизированная проходка (ТПМК, щиты с гидропригрузом, двойные щиты, специальные конфигурации для сложных условий) описаны в 64 докладах (28 %), демонстрируя разнообразие технических решений и опыт их применения в разных геологических и городских контекстах. Микротоннелирование, продавливание и погружные тоннели рассматриваются примерно в 34 докладах (15 %), охватывая проекты коммунальных и транспортных тоннелей, а также инновационные подходы к стыковке и герметизации секций. Инновации, автоматизация, робототехника и цифровые технологии рассмотрены в 27 докладах (12 %), включая системы автоматического проектирования, роботизированный монтаж, мониторинг и прогнозную аналитику; безопасность, пожарная защита, сейсмика и управление рисками – 23 доклада (10 %), отражены также вопросы проектирования и модернизации систем безопасности, оценки уязвимости и внедрения стандартов (рис. 5б).

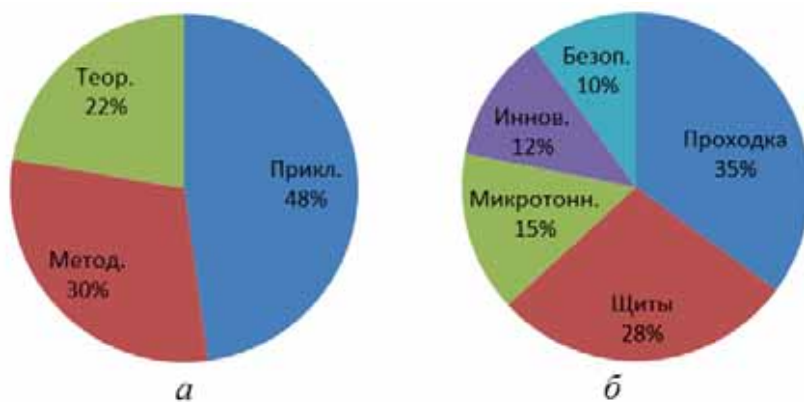


Рис. 5. Распределение докладов в разделе «Методы строительства, инновации и реализация проектов»: а – по направленности; б – по объектам

Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и управление активами

Доклады этого раздела охватывают комплекс вопросов, связанных с обеспечением долгосрочной работоспособности и надёжности подземных транспортных и инфраструктурных объектов – от проектных решений, закладывающих долговечность конструкций, до современных методов мониторинга, обслуживания и восстановления эксплуатируемых тоннелей. Ключевым вектором развития показан переход к управлению активами на основе данных: интеграция цифровых инструментов оценки технического состояния, прогнозного обслуживания и количественной оценки деградации конструкций с учётом реальных эксплуатационных и внешних воздействий. В материалах прослеживается стремление к балансу между сохранением исторической ценности и функциональной пригодностью объектов: адаптация старых тоннелей к современным нагрузкам при максимальном сохранении оригинальной структуры, а также внедрение решений, повышающих устойчивость к экстремальным сценариям (сейсмика, пожары, оползни, вибрации).

Значительное внимание уделено вопросам долговечности бетонных конструкций и методам оценки их разрушения. Представлены подходы к проектированию на основе критериев долговечности, модели разрушения обделок по данным периодических визуальных осмотров и испытаний, а также анализ влияния временных факторов на первичные системы крепления в необлицованных тоннелях. Доклады практической направленности охватывают как новые объекты, так и исторические тоннели с каменной кладкой, демонстрируя сочетание традиционных методов оценки с современными цифровыми технологиями. Особое место занимает анализ огнестойкости и сейсмической устойчивости существующих сооружений, в том числе тоннелей метрополитена, водоводов и транспортных тоннелей постройки первой половины XX века, с оценкой влияния износа (например, уменьшения толщины обделки) на их несущую способность.

Важное направление докладов раздела – диагностика и мониторинг технического состояния. Здесь раскрыты решения на базе мобильных измерительных систем и наземного лазерного сканирования, включая методы подтверждения точности измерений деформаций поперечного сечения, алгоритмы семантической сегментации облаков точек и учёт влияния помех (например, размытия изображения при движении) на работу нейросетевых систем обнаружения дефектов. Практические описания иллюстрируют создание баз данных по результатам регулярных осмотров, включение больших языковых моделей в системы расширенной реальности для инспекции, а также разработку специализированных инструментов для выделения критических зон. Эти подходы позволяют систематизировать данные о дефектах, формализовать критерии принятия решений по ремонту и обеспечить прослеживаемость изменений состояния тоннелей во времени.

Вопросы эксплуатации и внешних воздействий рассматриваются как факторы, требующие комплексного учёта на всех стадиях ЖЦ. В докладах представлены результаты анализа передачи вибраций от строительных работ (например, от вибропогружения шпунта) на чувствительные подземные сооружения, моделирования гидродинамических нагрузок на стены гидротехнических туннелей, а также оценки влияния крупных геотехнических процессов (оползни, расширение карьеров) на устойчивость тоннелей. Особое внимание уделено сейсмическому анализу – от оценки повреждений по данным реальных землетрясений до разработки стратегий усиления и модернизации существующих объектов. Доклады практической направленности охватывают объекты в сейсмоопасных регионах, а также тоннели, подверженные воздействию агрессивных сред и сложных гидрогеологических условий.

Широкий спектр технических решений представлен в докладах по ремонту и восстановлению тоннелей (от срочного ремонта коллекторных туннелей до масштабных проектов реконструкции объектов столетней давности). Описаны работы по модернизации тоннелей без остановки движения, проекты полной разборки и перестройки свода, методы гидроизоляции и стабилизации действующих газотранспортных тоннелей с помощью инъекционных смол, решения для тоннелей в сульфатных породах, технологии спиральной обделки для усиления малых тоннелей, применение многолезвийных бетонорезов для реконструкции старых железнодорожных тоннелей. Отдельное внимание уделено восстановлению объектов после экстремальных воздействий, в частности, обеспечению функциональной пригодности горных тоннелей, повреждённых пожарами.

Из 53 докладов раздела **прикладные материалы**: описание реализованных проектов, результаты внедрения технологий на конкретных объектах приведены в 25 докладах (47 %). К ним относятся проекты реконструкции и модернизации различных тоннелей, работы по восстановлению заброшенных и повреждённых объектов, внедрение систем мониторинга и диагностики на действующих линиях (в том числе метро и железнодорожные туннели), а также реализация мер по гидроизоляции, усилению и адаптации тоннелей к новым нагрузкам.

Доклады **методического характера**: разработка инструментов, критериев и процедур оценки, подходов к моделированию, испытаниям и контролю качества – 20 докладов (38 %). Это исследования по проверке мобильных измерительных технологий, алгоритмам обработки облаков точек, моделям деградации бетона, методам неразрушающего контроля пустот за обделкой и подходам к оценке сейсмической уязвимости.

Доклады **теоретической и концептуальной направленности**: развитие фундаментальных подходов к анализу долговечности, надёжности и устойчивости тоннелей – 8 докладов (15 %), включая исследования по моделированию долговременных деформаций под влиянием склоновых процессов, гидродинамических нагрузок и ползучести грунтов, а также по оценке влияния внешних воздействий (вибрации, температурные градиенты) на напряжённо-деформированное состояние конструкций (рис. 6а).

По предметной направленности доклады раздела распределяются следующим образом. Диагностика, мониторинг и цифровые технологии (включая мобильные системы, LiDAR, ИИ, обработку облаков точек, базы данных по осмотрам) – 15 докладов (28 %), отражая растущую роль автоматизации и объективных данных в управлении активами; эксплуатация, внешние воздействия и оценка рисков (сейсмика, оползни, вибрации, гидродинамика, пожары) – 14 докладов (26 %), демонстрируя необходимость учёта широкого спектра угроз при планировании обслуживания и модернизации;

ремонт, восстановление и усиление (включая гидроизоляцию, инъекционные методы, спиральную обделку, демонтаж и перестройку, срочный ремонт) – 12 докладов (23 %), охватывая как масштабные проекты реконструкции, так и локальные решения для конкретных типов повреждений;

долговечность, разрушение и проектирование на весь ЖЦ – 8 докладов (15 %), включая модели старения бетона, критерии долговечности и анализ временных эффектов на системы крепления;

нормативно-методические и организационные аспекты (рекомендации по проектированию слоёв бетона, рамки обслуживания для специфических условий, интеграция стандартов в цифровые системы) – 4 доклада (8 %), отражая вопросы стандартизации и формализации процедур управления активами (рис. 6б).

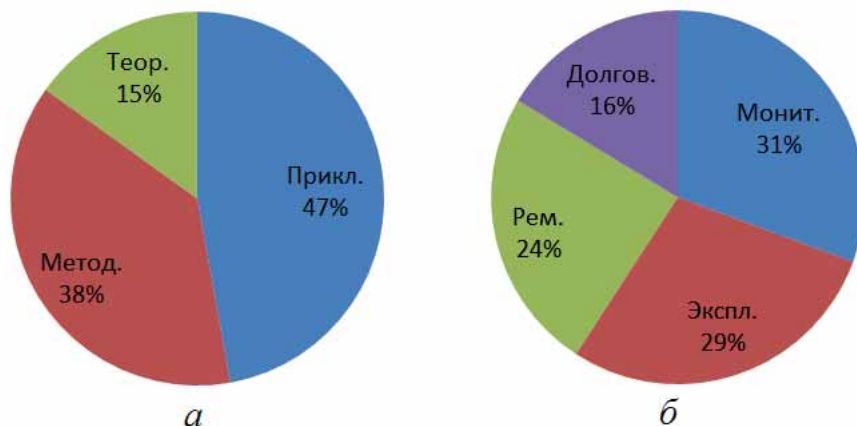


Рис. 6. Распределение докладов в разделе «Ввод в эксплуатацию, эксплуатация и управление активами»:
а – по направленности; б – по процессам

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Мировой конгресс ITA-AITES 2026 наглядно продемонстрировал, что тоннелестроение находится в фазе активного качественного развития. Основные тенденции отрасли, отражённые в материалах конгресса, включают:

- переход от точечных решений к системному планированию подземного пространства с учётом долгосрочных стратегий устойчивого развития городов и регионов;
- активную цифровизацию всех этапов жизненного цикла объектов, создание комплексных цифровых двойников;
- интеграцию технологий искусственного интеллекта в процессы управления строительством и эксплуатацией;
- приоритет экологической ответственности: снижение углеродного следа, переработка материалов, энергоэффективность;
- совершенствование контрактных отношений и моделей управления рисками;
- развитие методов прогноза и контроля геологических условий, включая опережающую разведку и непрерывный мониторинг;
- повышение безопасности труда и социальной ответственности бизнеса.

Конгресс стал площадкой для обмена опытом между специалистами из разных стран, позволил обобщить лучшие практики и определить направления дальнейших исследований.

Сборник трудов конгресса представляет собой своего рода комплексный справочник по современному состоянию тоннелестроения, охватывая как устоявшиеся методологии, так и передовые разработки. Он будет служить ценным источником знаний в области подземного строительства.

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»

Вып. 2(49) 2026

Редактор выпуска: Починина Н.Е.
Компьютерная верстка: Орлов Н.С.

Дата выхода в свет: 28.07.2026 г. Формат 70×100/16
Бумага мелованная. Офсетная печать.
Тираж 500 экз. Заказ № 3615.4

Отпечатано в типографии ООО «Принт».
426035, г. Ижевск, ул. Тимирязева, 5.

Свободная цена