



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИЛ. В. А. КУЧЕРЕНКО



НИИСТ
ИЛ. А. А. ВОЗДВЕНОВА



НИИОП
ИЛ. Н. А. ТЕРСЕВАНОВА

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

№ 1(44) 2025

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 1(44) 2025

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

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.





**RESEARCH CENTER
OF CONSTRUCTION**
Joint Stock Company

BULLETIN

of Science and Research Center
of Construction

No. 1(44) 2025

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

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



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

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, академик
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. Герсванова
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

МАИЛАН 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, член-корреспондент Российской
академии архитектуры и строительных наук (РААСН) ГОУ ВПО
«СПбГАСУ»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

МИРСАЯПОВ 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-МАРТИРОСЯН Армен Заенович, 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

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

Вестник НИЦ «Строительство»
Научный потенциал строительной отрасли
Вып. 1[44] / под ред. А.И. Звездова. –
М.: АО «НИЦ «Строительство», 2025. – 173 с.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI журнала: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI выпуска: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\[44\]](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1[44])
В действующем Перечне ВАК от 18.03.2025 г. под номером 621.

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», 2025

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

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, Academician of 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 "Energoeffect", 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

SHULYATYEV Oleg A., Dr. Sci. (Engineering), Professor 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 1[44] / edited by A.I. Zvezdov. – M.: JSC Research Center of Construction, 2025. – 173 p.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI journal <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI issue [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\[44\]](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1[44])

In the current version of List of HAC from March 18, 2025 our journal has a number 621.

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, 2025

Содержание

Строительные конструкции, здания и сооружения

Барков А.С., Астафьева Н.С.

Специфика проведения строительного контроля на международных стройках в условиях Крайнего Севера 7

Ильюшенков А.О.

В развитие нормативного расчета на устойчивость изгибаемых элементов двутаврового постоянного и переменного сечений по СП 16.13330.2017 20

Комарова М.А., Гришин И.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В., Власкин И.А.

Повышение огнестойкости и снижение пожарной опасности строительных конструкций, выполненных из современных древесных материалов 40

Пономарев О.И., Мухин М.А., Чигрина О.С., Клейменов М.И., Худайнатов А.Э.

Огнестойкость кладки из крупноформатных керамических камней 61

Серых А.А.

Способ повышения прочности и долговечности тонкостенных элементов металлических конструкций 75

Шейкин Е.В., Степанова В.Ф.

Закономерности распределения влажности в слоистой структуре материалов конструкций объектов культурного наследия 84

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Алексеев А.Г., Виноградова С.А.

Взаимодействие многолопастных винтовых свай с песчаным основанием 101

Алешин А.С., Погребченко В.В., Никитин С.Н.

Об учете неровностей подземного рельефа при сейсмическом микрорайонировании сосредоточенного объекта 113

Колыбин И.В., Разводовский Д.Е., Скориков А.В.

Безопасность оснований и фундаментов при переходе на параметрическую модель нормирования в строительстве 131

Управление жизненным циклом объектов строительства

Волков А.А., Челышков П.Д., Давыдов А.Е., Никитенко А.А.

Анализ применения классификаторов при выполнении обязательных процедур в строительном комплексе 148

Кудинов С.А., Зайчук М.Б.

Технологии ИИ для генерации цифровых моделей развития территорий 159

Contents

Building constructions, buildings and structures

Barkov A.S., Astafieva N.S.
Construction supervision at international construction sites in the Far North 7

Ilyushenkov A.O.
On the SP 16.13330.2017 standard stability calculation of I-type bending elements
with constant and variable cross-sections..... 20

Komarova M.A., Grishin I.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Vlaskin I.A.
Increasing fire resistance and reducing fire hazard of building structures made
of advanced wood materials 40

Ponomarev O.I., Mukhin M.A., Chigrina O.S., Kleimenov M.I., Khudainatov A.E.
Fire resistance of large-block ceramic masonry 61

Serykh A.A.
Method for increasing the strength and durability of thin-walled elements in metal
structures 75

Sheikin E.V., Stepanova V.F.
Moisture distribution patterns of layered structural materials in cultural heritage
objects 84

Foundations, underground structures

Alekseev A.G., Vinogradova S.A.
Interaction of multi-blade screw piles with a sandy base 101

Aleshin A.S., Pogrebchenko V.V., Nikitin S.N.
Subsurface contour unevenness in seismic microzoning of a point facility 113

Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V.
Safety of bases and foundations in the transition to the parametric standardization model
of construction 131

Lifecycle management of construction projects

Volkov A.A., Chelyshkov P.D., Davydov A.E., Nikitenko A.A.
Classifiers in mandatory procedures of the construction complex 148

Kudinov S.A., Zaichuk M.B.
AI technologies for generating digital models of territorial development 159

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-7-19](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-7-19)
УДК 658.562

EDN: ENGYOS

СПЕЦИФИКА ПРОВЕДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОНТРОЛЯ НА МЕЖДУНАРОДНЫХ СТРОЙКАХ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

А.С. БАРКОВ^{1,✉}Н.С. АСТАФЬЕВА², канд. экон. наук

¹ Филиал общества с ограниченной ответственностью «РН-СтройКонтроль», ул. Мельникайте, д. 116, к. 1, г. Тюмень, 625007, Российская Федерация

² Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, ул. Политехническая, д. 29Б, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Статья рассматривает специфику строительного контроля на международных стройках в условиях Крайнего Севера, акцентируя внимание на уникальных вызовах, с которыми сталкиваются проектные команды.

Цель. Детальный анализ опыта работы на международных объектах по добыче природных ресурсов, в частности на проекте «Арктик-СПГ2», который связан с газовой промышленностью. Освещаются разнообразные проблемы, возникающие в результате экстремальных климатических условий, а также логистические и материальные вопросы, включая соблюдение нормативов различных стран в контексте строительного контроля.

Материалы и методы. Статья предлагает различные методы контроля, устойчивые к суровым погодным условиям, что критически важно для успешной реализации проектов. Представлены методы контроля, которые доказали свою эффективность в арктическом климате для обеспечения качества и безопасности строительства.

Результаты. Приведены примеры различий в отечественной и зарубежной нормативной документации, применяемой для строительства международных объектов, что подчеркивает необходимость адаптации подходов к специфике региона.

Выводы. В заключении статьи содержатся рекомендации по мотивации персонала, обучению инженеров, оптимизации логистики и внедрению современных технологий, направленных на улучшение качества и эффективности процесса строительного контроля. Эти меры помогут не только повысить производительность труда, но и обеспечить безопасность и устойчивость объектов, что особенно актуально в условиях меняющегося климата и растущих экологических требований. Также подчеркивается важность внедрения современных технологий для повышения качества и эффективности строительного контроля, что является ключевым фактором успешной реализации проектов в сложных климатических условиях.

Ключевые слова: строительный контроль, международное строительство, Крайний Север, строительный мониторинг, геодезический контроль, дефектоскопия, анализ данных, нормативно-техническая документация

Для цитирования: Барков А.С., Астафьева Н.С. Специфика проведения строительного контроля на международных стройках в условиях Крайнего Севера. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):7–19. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-7-19](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-7-19)

Вклад авторов

Барков А.С. – написание текста рукописи, оформление рукописи, работа с графическим материалом, сбор и анализ данных литературы, проведение сравнительного анализа, интерпретация результатов исследования.

Астафьева Н.С. – редактирование текста рукописи, формулировка выводов, критический пересмотр текста рукописи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 02.10.2024

Поступила после рецензирования 11.11.2024

Принята к публикации 28.11.2024

CONSTRUCTION SUPERVISION AT INTERNATIONAL CONSTRUCTION SITES IN THE FAR NORTH

A.S. BARKOV^{1,✉}

N.S. ASTAFIEVA², Cand. Sci. (Economics)

¹ Branch of the RN-StroiKontrol LLC, Melnikaite str., 116, bld. 1, Tyumen, 625007, Russian Federation

² Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Polytechnicheskaya str., 29B, St. Petersburg, 195251, Russian Federation

Abstract

Introduction. The present paper examines the specifics of construction supervision at international construction sites in the Far North, focusing on the unique challenges faced by project teams.

Aim. The study aims to perform a detailed analysis of the experience in working at international natural resource extraction sites, in particular the Arktik-SPG2 project related to the gas industry. Various challenges arising from extreme climatic conditions, as well as logistic and material issues are covered taking into account compliance with construction supervision regulations of various countries.

Materials and methods. The article proposes various supervision methods that are resistant to harsh weather conditions, which is critical for the successful implementation of projects. Supervision methods that have proven their effectiveness in the Arctic climate as ensuring the quality and safety of construction are presented.

Results. We provide the examples of differences in domestic and foreign regulatory documentation used for the construction of international facilities, emphasizing the need to adapt approaches to the regional specifics.

Conclusions. The article concludes with recommendations on staff motivation, engineer training, logistics optimization, and introduction of contemporary technologies for improving the quality and efficiency of construction supervision. In addition to the improved productivity, these measures will ensure the facility safety and sustainability especially important in the context of changing climate and growing environmental requirements. Moreover, we emphasize the importance of introducing contemporary technologies improving the quality and efficiency of construction supervision as a key factor in the successful implementation of projects in difficult climatic conditions.

Keywords: construction supervision, international construction, Far North, construction monitoring, geodetic control, flaw detection, data analysis, regulatory and technical documentation

For citation: Barkov A.S., Astafieva N.S. Construction supervision at international construction sites in the Far North. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):7–19. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-7-19](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-7-19)

Authors contribution statement

Barkov A.S. – writing and designing the manuscript, working with graphic material, collecting and analyzing literature data, conducting a comparative analysis, interpreting the research results.

Astafieva N.S. – editing the text of the manuscript, formulating conclusions, critically revising the manuscript.

Funding

No funding support was obtained for the study.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 02.10.2024

Revised 11.11.2024

Accepted 28.11.2024

Введение

Районы Крайнего Севера скрывают в себе массу природных ресурсов, без которых современное индустриальное общество не может обойтись. Примерами таких ресурсов служат природный газ (преимущественно метан, CH_4 , из которого потом производят сжиженный природный газ (СПГ)), драгоценные металлы (палладий, осмий, золото), цветные металлы (медь, никель, кобальт), редкоземельные металлы (тантал, литий, ниобий) и нефть. О величине объемов полезных ископаемых может свидетельствовать отчет, подготовленный геологической службой США от 20 августа 2009 года, в котором говорится, что около 22 % мировых запасов нефти и газа расположены под водами Арктики [1].

Примечательно, что не только районы Крайнего Севера на территории Российской Федерации богаты своими недрами, но также и страны Скандинавии (Швеция, Норвегия, Финляндия) [2], Канада [3] и США [1]. На рис. 1 и 2 проиллюстрированы территории Арктики и районов Крайнего Севера.

Учитывая вышеприведенные факторы, появление международных объектов по освоению недр Земли в районах Крайнего Севера оставалось лишь вопросом времени. Так, например, первые упоминания об освоении и изучении Арктических регионов земного шара относятся к 325 г. до н. э., когда Пифей в ходе своего северного плавания первым описал полярный день и северное сияние при попытке найти источники



Рис. 1. Арктика
Fig. 1. Arctic Region

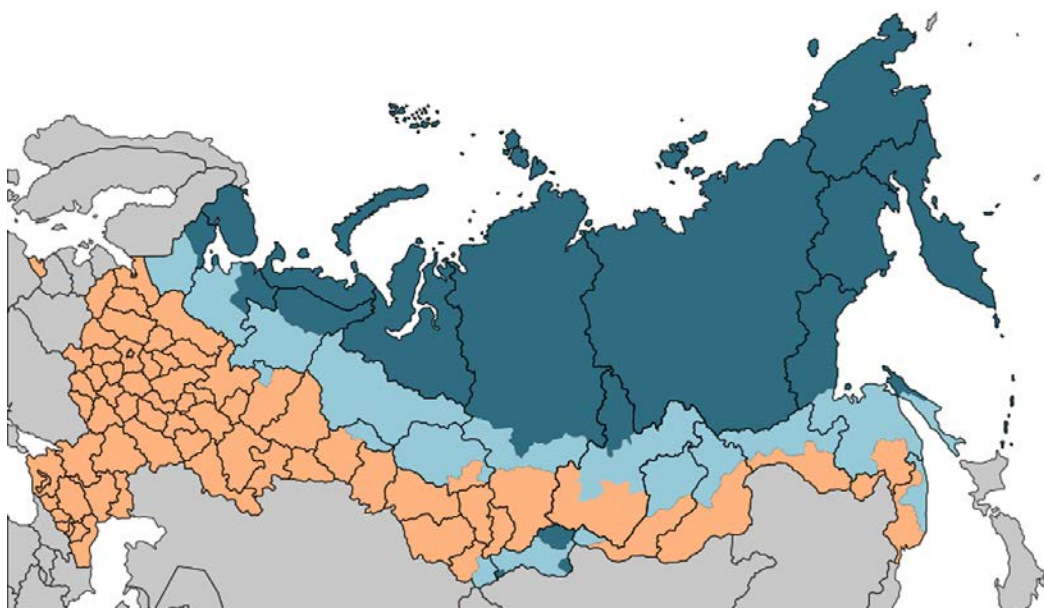


Рис. 2. Территории Российской Федерации с обозначенными районами Крайнего Севера (темно-синий, $S = 5,5$ млн км²) и местностями, приравненными к районам Крайнего Севера (голубой, $S = 3,4$ млн км²)

Fig. 2. Territories of the Russian Federation with designated regions of the Far North (dark blue, $S = 5.5$ million km²) and localities equivalent to the regions of the Far North (light blue, $S = 3.4$ million km²)

металлического олова [4]. Однако успешные попытки в освоении Крайнего Севера пришлось только на середину XX века в ходе Вайгачской экспедиции ОГПУ по разведке и добыче полезных ископаемых на острове Вайгач [5, 6].

Только после привлечения специалистов из разных стран, использования существующих технологий и опыта строительства в условиях Крайнего Севера появилась возможность извлекать максимальную пользу от разработки таких месторождений. Примером тому может служить начало добычи газа Норвегией в Северном море в 1971 году с помощью сотрудничества со специалистами из СССР [7].

На текущий момент в российской нормативно-технической базе отсутствуют документы, выполненные с учетом специфики строительства в условиях Арктического региона, что требует особого внимания к разработке новых стандартов. Данные условия, характеризующиеся экстремально низкими температурами, частыми температурными колебаниями и воздействием коррозионно-активных агентов, накладывают дополнительные требования на выбор и применение строительных материалов, таких как бетон и металлоконструкции, а также на методы их защиты. Вопросы надежности и долговечности конструкций, используемых на арктических объектах, требуют создания нормативов, учитывающих климатические особенности для обеспечения безопасности и устойчивости инфраструктуры в течение всего жизненного цикла. Дефицит специализированных нормативов и стандартов осложняет строительный контроль и эксплуатацию объектов, что обуславливает необходимость проведения исследований и разработки нормативно-технических документов, отвечающих требованиям Арктического региона.

При этом современные технологии к 2024 году совершили большой скачок по отношению к тем, которые были в середине XX века. Так, например, появились вычислительные

машины, программное обеспечение и новейшие подходы к проектированию капитальных объектов и производству строительно-монтажных работ, которые опираются на опыт, полученный человеком за все время нахождения в районах Крайнего Севера.

В статье представлен и проанализирован опыт работы, полученный при строительстве международного объекта, расположенного на территории Крайнего Севера Российской Федерации, – проект «Арктик-СПГ 2» по добыче природного газа, его сжижения и дальнейшей транспортировки в виде СПГ [8]. На данном международном объекте осуществлялось взаимодействие с представителями зарубежного научного сообщества, включая французских, китайских и сербских коллег. Был получен ценный опыт, который послужил улучшению качества строительного контроля.

При работе на данном объекте ставились задачи по аккумулированию информации, полученной от руководителей строительно-монтажных работ, связанных с устройством свайного основания и фундаментов. При проведении сравнительного анализа и выявлении отклонений от рабочей документации производились согласования неточностей и разрабатывались корректирующие действия по их устранению. Далее проходило согласование с представителем авторского надзора и в установленном заказчиком порядке осуществлялись подготовка, оформление и подписание исполнительной документации всеми участниками строительства.

В статье рассмотрены особенности и сложности проведения строительного контроля, связанные с климатическими условиями Севера, материальными и логистическими проблемами, а также с соблюдением нормативных и технических регламентов разных стран. Справедливо также отметить, что работа специалистов вдали от цивилизации и родного дома, а также в сложных погодных условиях, при плохой связи и интернете повышала физические и психологические нагрузки на людей, что нередко приводило к конфликтным ситуациям. Возникали сложности во взаимодействии и координации между специалистами строительного контроля в связи с языковым барьером, что, как правило, происходит на международных строительных объектах.

Первая проблема, с которой пришлось столкнуться, – это **большое количество отклонений от проектной и рабочей документации**. Тому может быть множество причин, например упущения, которые допустил проектный институт, человеческий фактор при производстве работ, а также то, что работы в условиях Крайнего Севера имеют сложную **логистику** до объекта строительства, вследствие чего **замена отсутствующего запроектированного материала** на тот, который имеется в данный момент на объекте, и его согласование с проектным институтом – это те издержки, которые приходится учитывать при проведении строительного контроля. Примером согласования отклонения от рабочей документации является устройство монолитного двухступенчатого ростверка. Согласно проекту, данная конструкция должна была быть устроена в один этап бетонирования. Однако из-за ограниченных ресурсов и для упрощения монтажа было принято решение согласовать бетонирование в два этапа с устройством холодного шва при условии соблюдения требований пункта 5.3 СП 70.13330.2012 [9] относительно организации швов при бетонировании.

Второй проблемой является **ограниченность современного оборудования и средств контроля**, способных работать в условиях Крайнего Севера. Как было сказано выше, в районах, расположенных за полярным кругом, покрытие интернета недостаточное и не всегда устойчивое, что делает **затруднительным применение современных технологий, таких**

Таблица 1

Климатические параметры холодного периода года в районах Крайнего Севера

Table 1

Climatic parameters for the cold period of the year in the Far North areas

Наименование района	Температура воздуха наиболее холодных суток, °С	Температура воздуха самой холодной пятидневки, °С	Абсолютно минимальная температура воздуха, °С	Средняя суточная амплитуда температуры воздуха наиболее холодных суток, °С
Маррессаля	-46	-42	-50	7,9
Надым	-45	-47	-58	9,0
Салехард	-49	-44	-54	9,0
Тарко-Сале	-53	-49	-55	8,8
Уренгой	-54	-50	-56	9,4

как GIS (Geographic Information System), использующие технологии RTK (Real Time Kinematic) и GNSS (Global Navigation Satellite System, например американский GPS, российский ГЛОНАСС, европейский Galileo и китайский BeiDou).

Не каждое оборудование способно работать под открытым небом при экстремально низких температурах [10] (табл. 1).

Таким образом, при проведении строительного контроля в условиях Крайнего Севера необходимо использовать методы, которые устойчивы к экстремальным погодным условиям. К ним можно отнести следующие.

1. **Визуально-измерительный контроль (ВИК).** Данный вид контроля обязателен для всех видов выполненных работ, прост в использовании, имеет высокую скорость проведения и не требует больших затрат, однако данный метод не подходит для выявления скрытых дефектов конструкций и материалов.

2. **Строительная лаборатория (СЛ) и лаборатория неразрушающего контроля (ЛНК).** Данные методы контроля также являются обязательными при выполнении всех видов работ и, в отличие от ВИК, направлены на выявление большего спектра дефектов. Например, при бетонных работах СЛ производит отбор проб бетонной смеси для изготовления контрольных образцов и дальнейшего испытания по определению удобоукладываемости, средней плотности, пористости, расслаиваемой температуры и сохраняемости свойств бетонной смеси [11], а ЛНК с помощью неразрушающих методов контроля сварных соединений (например, ультразвуковой и магнитно-порошковый) способна выявлять скрытые дефекты в сварных соединениях металлических конструкций [12]. Однако в отличие от ВИК контроль, проводимый СЛ и ЛНК, является более дорогостоящим, сильно зависит от оборудования и для получения результатов обследования требует большего времени.

3. **Геодезический контроль.** Несмотря на то что в условиях ограниченного покрытия интернета затруднительно использовать такие методы контроля, как GIS и GNSS, геодезический контроль все равно остается одним из важнейших при строительстве объектов. Современные электронные тахеометры просты в использовании, надежны, однако модификации, предназначенные для работы в полярных условиях, имеют повышенную стоимость (например, цены на тахеометр GeoMax Zoom 502" POLAR accXess10 начинаются от 1,5 млн руб.).

Третьей и заключительной проблемой является то, что для объектов международного строительства существуют **различия в нормативной документации**. Несмотря на то что современные российские ГОСТы и международные стандарты ISO разрабатываются и приводятся в соответствие друг с другом, до сих пор множество нормативных документов различаются или даже противоречат друг другу. Примером тому могут служить СП 28.13330.2017 [13] и ISO 12944 [14], которые предъявляют разные требования для защиты от коррозии стальных конструкций. Несмотря на то что в 2019 году на основании ISO 12944 [13] был разработан ГОСТ 34667.5-2021 [15], СП 28.13330.2017 [13] не утратил своего статуса и все еще действителен на территории Российской Федерации.

Для примера приведем сравнение **методов определения характеристики агрессивности окружающей атмосферы** по [13, 14].

ISO 12944 [14] описывает воздействие окружающей среды на стальные конструкции, находящиеся в атмосфере, погруженные в воду или заглубленные в грунт. В стандарте представлена система классификации, основанная на категориях коррозионной активности для разных условий окружающей среды. Выделяется **6 категорий коррозионной активности**, начиная от C1 (очень низкая) до CX (экстремально высокая). Ключевым критерием определения категории является **потеря массы на единицу поверхности или уменьшение толщины образцов после первого года воздействия**. Данный практический метод дает наиболее точные представления об условиях, в которых будет эксплуатироваться лакокрасочная система. Также допускается определение коррозионной активности окружающей среды по **ISO 9223** [16], в котором категория агрессивности определяется в зависимости от **суммарной продолжительности увлажнения поверхности в течение года** [16, табл. В.1], **наружной концентрации некоторых из наиболее важных загрязняющих веществ в различных типах сред** (например, оксид серы или озона) [16, табл. В.2, В.3, В.4].

СП 28.13330.2017 [13] выделяет несколько уровней агрессивного воздействия сред на металлические конструкции: **неагрессивный, слабоагрессивный, среднеагрессивный и сильноагрессивный**. Для **газовых сред** также добавлены уровни **слабоагрессивный-1 и слабоагрессивный-2**. Степень агрессивности зависит от **продолжительности увлажнения поверхности** и может быть оценена при наличии как **газовых**, так и **твердых сред**. Перечень агрессивных газов, влияющих на оценку среды, включает в себя восемь видов: диоксид углерода, аммиак, диоксид серы, фторид водорода, сульфид водорода, оксиды азота, хлор и хлорид водорода.

В отличие от ISO 12944 [14], СП 28.13330.2017 [13] представляет собой более детальный подход к оценке агрессивности атмосферы, хотя имеет общую схожесть с ним по перечню веществ, используемых для этой цели. Особое внимание уделяется твердым средам, которые могут усилить агрессивность в зависимости от их взаимодействия с влагой. Данный стандарт оценивает растворимость твердых веществ в воде и их гигроскопичность. Некоторые из перечисленных веществ могут образовывать на поверхности сильные электролиты, что следует учитывать при выборе системы покрытия. Для определения степени агрессивного воздействия атмосферы необходимо учитывать концентрацию газов и твердых сред, а также относительную влажность и продолжительность увлажнения поверхности. Для получения точной информации о климатических условиях можно обратиться к специализированным источникам метеорологической и климатологической информации, так как данные, приведенные в ГОСТ 9.039-74 [17], могут быть устаревшими из-за климатических изменений.

Подводя итог сравнения двух стандартов в части определения характеристики агрессивности окружающей атмосферы, можно сделать вывод о том, что **СП 28.13330.2017 [13] учитывает большее количество факторов агрессивности и предлагает более детальный подход**, чем ISO 12944 [14]. Однако необходимо отметить, что не вся необходимая информация может быть актуальной при использовании СП 28.13330.2017 [13], например при определении продолжительности увлажнения, в то время как **ISO 12944 [14] предлагает более практичную и простую методику оценки агрессивности окружающей атмосферы**.

Кроме защиты металлоконструкций от воздействия коррозии одним из важнейших аспектов строительства в условиях Крайнего Севера является сохранение тепла, поэтому при проектировании зданий и сооружений следует особенно обращать внимание на расчетные значения теплопроводности строительных материалов. В своей статье «Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий» А. С. Горшков [18], рассматривая различие российских и международных стандартов по теплопроводности строительных материалов и проводя сравнение ГОСТ 7076-99 [19], ГОСТ 17177-94 [20], СП 50.13330.2012 [21], ISO 6949 [22], ISO 10456 [23], установил, что при разработке [21] не был проведен должный анализ иностранных технологий и методов проектирования, вследствие чего данный нормативный документ ставит дополнительные преграды по взаимному использованию технологий. Из сравнения российских и европейских методов определения расчетных характеристик строительных материалов и изделий последние имеют под собой более обоснованные и грамотные характеристики, например для зданий, рассчитываемых на срок эксплуатации более 50 лет, свойства материалов сразу после выпуска или в течение первых лет эксплуатации не столь важны, чем те, которыми они будут обладать через 10, 20 и более лет [18].

Помимо разницы расчетных характеристик ГОСТ и ISO по сравнительному анализу, проведенному А. Р. Галлямовым в своей статье «Исследование и сравнение российских и международных норм в строительстве при проектировании» [24], выявились существенные различия между СП 20.13330.2016 [25], СП 63.13330.2018 [26] и международными стандартами EN 1990 [27], EN 1991 [28], EN 1992 [29]. К примеру, приводится сводная таблица по сравнению нагрузок, составленных для конструкций и материалов по СП 20.13330.2016 [25] и EN 1991-1-1 [30], в которой видно, что нагрузки, полученные по EN 1991-1-1 [30], в среднем выше тех, которые получены по СП 20.13330.2016 [25], на 13,06 %, что приводит к более дорогостоящим проектным решениям. Данное различие получилось вследствие того, что в [30] дается единый коэффициент надежности по нагрузке для всех конструкций и элементов, который равен 1,35, в отличие от СП 20.13330.2016 [25], в котором даются различные коэффициенты надежности для различных конструкций (например, 1,1 – для стен зданий и каркаса, 1,3 – для кровли и полов).

Таким образом, различия между российскими нормативными документами (СП, ГОСТ, СНиП) и международными (EN, ISO, DIN, IEC) приходится учитывать на протяжении всего проведения строительного контроля, ведь российские и международные подходы к строительству и проектированию имеют как сильные, так и слабые стороны.

На сегодня отечественные нормативно-технические документы не содержат систематизированных требований, касающихся выбора строительных материалов и методов защиты конструкций в арктических зонах. Этот пробел в нормативной базе приводит к тому, что при проектировании и строительстве арктических объектов приходится адаптировать

общие стандарты и нормы, которые могут не учитывать специфические воздействия, характерные для сурового климата Арктики. Дефицит специализированных нормативов создает значительные сложности в реализации проектов и может негативно сказаться на безопасности и долговечности объектов.

Для обеспечения надежности строительных объектов в условиях Крайнего Севера требуется разработка нормативно-технической документации (НТД), включающей обоснованные требования к материалам и их защитным покрытиям, а также к строительным технологиям, способным эффективно противостоять низким температурам и коррозионным воздействиям. Включение в НТД рекомендаций по применению антикоррозионных составов для металлических конструкций и высокоморозостойких добавок для бетонов позволит значительно снизить риски разрушения конструкций в результате воздействия арктических факторов. Кроме того, требуется учет циклических температурных изменений, вызывающих термическую деформацию материалов, что особенно важно для металлических элементов конструкций, используемых в сложных климатических условиях.

Таким образом, разработка нормативно-технических документов, ориентированных на специфику Арктического региона, является необходимым условием для повышения качества и безопасности строительного процесса. Введение таких стандартов позволит минимизировать затраты на ремонт и обслуживание объектов, повысить надежность и долговечность конструкций и упростить процессы строительного контроля на всех этапах их эксплуатации.

Заключение

Список трудностей осуществления подобных проектов не ограничивается перечисленными проблемами, с которыми приходится сталкиваться при проведении строительного контроля на международных объектах строительства в районах Крайнего Севера, однако благодаря усилиям команды и оперативным мероприятиям данные проблемы можно преодолеть и обеспечить повышенное качество выполнения надзорных работ.

Отсутствие нормативно-технических документов, ориентированных на особенности эксплуатации конструкций в условиях Арктического региона, представляет значительную проблему, сдерживающую внедрение эффективного строительного контроля и затрудняющую обеспечение надежности промышленных объектов в северных широтах. Актуальность создания и адаптации НТД, учитывающей специфические требования к материалам и методам их защиты, становится очевидной. Настоящее исследование подчеркивает необходимость проведения дальнейших научно-прикладных исследований для разработки специализированных стандартов, которые позволят повысить устойчивость объектов в сложных климатических условиях Арктики. Введение подобных стандартов будет способствовать улучшению качества строительства, снижению эксплуатационных рисков и повышению безопасности промышленных объектов в условиях низких температур, воздействия агрессивных сред и экстремальных климатических нагрузок.

Подводя итоги, можно выделить мероприятия, которые способствовали бы облегчению и повышению качества проведения строительного контроля:

1. Разработать и внедрить дополнительные мероприятия по мотивации персонала к работе в столь суровых условиях.

2. Произвести необходимое обучение, тренинги и повышение квалификации инженерных работников.

3. Оптимизировать логистику, для чего разработать новые стратегии по ее улучшению и регулярности поставок материалов, что позволит сократить время и затраты, а также уменьшить риски отсутствия необходимого количества строительных материалов.

4. Для уменьшения ошибок, допускаемых на стадии проектирования, необходимо использовать современные методы технологий информационного моделирования.

5. Развивать направления по международному сотрудничеству и обмену опытом, что позволит находить и осуществлять новые подходы к совместному проведению строительного контроля и производства строительно-монтажных работ.

6. Адаптировать или разработать новые российские нормативно-технические документы, которые стали бы актуальными для проведения и контроля работ в районах Крайнего Севера.

Список литературы

1. Committee on Appropriations. US Congressional Hearing. Strategic Importance of the Arctic in US Policy – USA, 08.20.2009. Washington: U.S. Government Printing Office; 2010.
2. Ранкама К., ред. Докембрий Скандинавии: сб. ст. Москва: Мир; 1967.
3. Wallace W.S., ed. Geology of Canada. In: The Encyclopedia of Canada. Vol. III. Toronto: University Associates of Canada; 1948, pp. 23–26.
4. Arctic, The. In: Columbia Encyclopedia, Sixth Edition. Columbia University Press; 2004.
5. Данилов М.А. Богатства северных недр: Краткий науч.-попул. очерк о геол. строении и полезных ископаемых Арханг. обл. Архангельск: Сев.-Зап. кн. изд-во; 1977.
6. Вайгачская экспедиция ОГПУ. Борисоглебское высшее военное авиационное ордена Ленина Краснознаменное училище летчиков им. В.П. Чкалова [интернет]. Режим доступа: https://www.bvvaul.ru/articles/text/rasskazi/loyko_povest/42.php.
7. Сулейманов А.А. Сотрудничество Советского Союза и приарктических стран в области научного изучения Арктики в годы «разрядки». В: 1945 год: формирование основ послевоенного мироустройства: сб. материалов Всерос. науч. конф. Киров: Радуга – ПРЕСС; 2015, с. 468–478.
8. Арктик СПГ 2 [интернет]. Режим доступа: <https://arcticspg.ru/> (дата обращения: 05.05.2024).
9. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200097510>.
10. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99 (с Изменениями № 1, 2) [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573659358>.
11. ГОСТ 10181-2014. Смеси бетонные. Методы испытаний [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200115733>.
12. ГОСТ Р 56542-2019. Контроль неразрушающий. Классификация видов и методов. Москва: Стандартинформ; 2019.
13. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456069587>.
14. ISO 12944-5:2019. Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 5: Protective paint systems [internet]. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77795/599bd9ab013244339213b4fb0721df4e/ISO-12944-5-2019.pdf>.
15. ГОСТ 34667.5-2021 (ISO 12944-5:2019). Материалы лакокрасочные. Защита стальных конструкций от коррозии при помощи лакокрасочных систем. Часть 5. Защитные лакокрасочные системы [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200181408>.
16. ISO 9223-2017. Коррозия металлов и сплавов. Коррозионная агрессивность атмосферы. Классификация, определение и оценка [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200158773>.
17. ГОСТ 9.039-74. Единая система защиты от коррозии и старения. Коррозионная агрессивность атмосферы [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200007203>.

18. Горшков А.С., Соколов Н.А. Несоответствие российских и международных стандартов при определении расчетных значений теплопроводности строительных материалов и изделий. Инженерно-строительный журнал. 2013;(7):7–14.
19. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200005006>.
20. ГОСТ 17177-94. Материалы и изделия строительные теплоизоляционные. Методы испытаний [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/901710454>.
21. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525>
22. ISO 10456:2007. Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values [internet]. Available at: <https://iteh-standards.uc.r.appspot.com/catalog/standards/iso/16d90460-a372-4405-8461-dc0e9fc2a9e6/iso-10456-2007>
23. ГОСТ Р ИСО 10456-2021. Материалы и изделия строительные. Тепловлажностные характеристики. Табличные значения расчетных теплотехнических характеристик и методы определения декларируемых и расчетных теплотехнических характеристик [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200180750>
24. Галлямов А.Р. Исследование и сравнение российских и международных норм в строительстве при проектировании. Актуальные исследования [интернет]. 2022;(46). Режим доступа: <https://apni.ru/article/4977-issledovanie-i-sravnenie-rossijskikh-i-mezhdu> (дата обращения: 19.08.2024).
25. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456044318>.
26. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2019.
27. EN 1990:2002. Eurocode – Basis of structural design [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>.
28. EN 1991-1-4: 2005+A1: 2010. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf>.
29. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>.
30. EN 1991-1-1. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.1.2002.pdf>.

References

1. Committee on Appropriations. US Congressional Hearing. Strategic Importance of the Arctic in US Policy – USA, 08.20.2009. Washington: U.S. Government Printing Office; 2010.
2. Rankama K., ed. Precambrian of Scandinavia. Vol. 1. New York: Interscience Publishers, 1963.
3. Wallace W.S., ed. Geology of Canada. In: The Encyclopedia of Canada. Vol. III. Toronto: University Associates of Canada; 1948, pp. 23–26.
4. Arctic, The. In: Columbia Encyclopedia, Sixth Edition. Columbia University Press; 2004.
5. Danilov M.A. Riches of the Northern Subsoil. Brief scientific and popular essay on geological construction and mineral resources of the Arkhangelsk region. Arkhangelsk: North-West book publishing house; 1977. (In Russian).
6. Vaigach Expedition of the OGPU. Borisoglebsk Higher Military Aviation Order of Lenin, Red Banner Pilot School named after V.P. Chkalov [internet]. Available at: https://www.bvvaul.ru/articles/text/rasskazi/loyko_povest/42.php. (In Russian).
7. Suleimanov A.A. Cooperation between the Soviet Union and Arctic Countries in the Field of Scientific Study of the Arctic during the Years of “Détente”. In: 1945: Formation of the Foundations of the Post-War World Order. Kirov: Raduga – PRESS Publ.; 2015, pp. 468–478. (In Russian).
8. Arctic LNG 2 [internet]. Available at: <https://arcticlpg.ru/> (accessed 05 May 2024). (In Russian).

9. SP 70.13330.2012. Load-bearing and separating constructions. Updated version of SNiP 3.03.01-87 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200097510>. (In Russian).
10. SP 131.13330.2020. Construction climatology. Updated version of SNiP 23-01-99 (with Amendments No. 1, 2) [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573659358>. (In Russian).
11. State Standard 10181-2014. Concrete mixtures. Methods of testing [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200115733>. (In Russian).
12. State Standard R 56542-2019. Non-destructive testing. Classification of types and method. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
13. SP 28.13330.2017. Protection against corrosion of construction. Updated version of SNiP 2.03.11-85 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456069587>. (In Russian).
14. ISO 12944-5:2019. Paints and varnishes — Corrosion protection of steel structures by protective paint systems Part 5: Protective paint systems [internet]. Available at: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/77795/599b-d9ab013244339213b4fb0721df4e/ISO-12944-5-2019.pdf>.
15. State Standard 34667.5-2021 (ISO 12944-5:2019). Coating materials. Corrosion protection of steel structures by coating systems. Part 5. Protective paint systems [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200181408>. (In Russian).
16. ISO 9223-2017. Corrosion of metals and alloys. Corrosivity of atmospheres. Classification, determination and estimation [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200158773>. (In Russian).
17. State Standard 9.039-74. Unified system of corrosion and ageing protection. Corrosive aggressiveness of atmosphere [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200007203>. (In Russian).
18. Gorshkov A.S., Sokolov N.A. Inconsistency of Russian and international standards in determining the calculated values of thermal conductivity of building materials and products. Magazine of Civil Engineering. 2013;(7):7–14. (In Russian).
19. State Standard 7076-99. Building materials and products. Method of determination of steady-state thermal conductivity and thermal resistance [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200005006>. (In Russian).
20. State Standard 17177-94. Thermal insulating materials and products for building application. Test methods [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/901710454>. (In Russian).
21. SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200095525>. (In Russian).
22. ISO 10456:2007. Building materials and products — Hygrothermal properties — Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values [internet]. Available at: <https://iteh-standards.uc.r.appspot.com/catalog/standards/iso/16d90460-a372-4405-8461-dc0e9fc2a9e6/iso-10456-2007>
23. State Standard R 10456-2021. Building materials and products. Hygrothermal properties. Tabulated design values and procedures for determining declared and design thermal values [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200180750>. (In Russian).
24. Gallyamov A.R. Research and comparison of Russian and international standards in construction during design. Aktual'nye issledovaniya [Current research] [internet]. 2022;(46). Available at: <https://apni.ru/article/4977-issledovanie-i-sravnenie-rossijskikh-i-mezhdu> (accessed 19 August 2024). (In Russian).
25. SP 20.13330.2016. Loads and actions [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456044318>. (In Russian).
26. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
27. EN 1990:2002. Eurocode – Basis of structural design [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf>.
28. EN 1991-1-4: 2005+A1: 2010. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1-4: General actions – Wind actions [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.4.2005.pdf>.
29. EN 1992-1-1. Eurocode 2: Design of concrete structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1992.1.1.2004.pdf>.

30. EN 1991-1-1. Eurocode 1: Actions on structures. Part 1-1: General actions – Densities, self-weight, imposed loads for buildings [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1991.1.1.2002.pdf>.

Информация об авторах / Information about the authors

Антон Сергеевич Барков[✉], ведущий специалист, 2-й разряд, Производственное Управление № 1, филиал общества с ограниченной ответственностью «РН-СтройКонтроль», Тюмень
e-mail: barkovanton1997@gmail.com

Anton S. Barkov[✉], Leading Specialist of the 2nd category, Production Department No. 1, Branch of the RN-StroiKontrol LLC, Tyumen
e-mail: barkovanton1997@gmail.com

Наталья Серафимовна Астафьева, канд. экон. наук, доцент, доцент высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

Natal'ya S. Astafieva, Cand. Sci. (Economics), Associate Professor, Higher School of Industrial, Civil, and Road Construction, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-20-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-20-39)
УДК 624.075.4

EDN: EAPXTJ

В РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНОГО РАСЧЕТА НА УСТОЙЧИВОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ДВУТАВРОВОГО ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЙ ПО СП 16.13330.2017

А.О. ИЛЬЮШЕНКОВ

АО «Территориальный проектный институт «Хабаровскпромпроект», ул. Уссурийский бульвар, д. 2, г. Хабаровск, 680000,
Российская Федерация

Аннотация

Введение. В настоящий момент нормы по стальным конструкциям (СП 16.13330.2017) содержат достаточно ограниченный материал в части расчета на устойчивость изгибаемых элементов. По-прежнему отсутствует какая-либо информация по расчету стержней переменного сечения на продольный и поперечный изгибы, как и на устойчивость таких элементов. Аналитические методы решения задач устойчивости продолжают оставаться востребованными и могут предложить более чем удобные решения в дополнение к численному анализу.

Цель. Развитие методики расчета на устойчивость изгибаемых элементов двутаврового постоянного и переменного сечений для улучшения раздела свода правил по стальным конструкциям в части устойчивости свода.

Материалы и методы. Разработка коэффициентов учета переменности поперечного сечения балки по длине, влияние градиента изгибающего момента аналитическим методом Бубнова – Галеркина. Альтернативная репрезентация изгибно-крутильной характеристики балки с учетом влияния места приложения нагрузки по высоте. Сравнение полученных аналитических решений в программных комплексах ЛИРА-САПР и ABAQUS.

Результаты. Прделанная аналитическая работа предлагает набор дополнительных коэффициентов и формул в поддержку развития методики расчета на устойчивость изгибаемых элементов. Решения находятся в согласии с философией СП 16.13330.2017. Результаты численного анализа подтверждают полученные аналитические решения.

Выводы. Текущее теоретическое исследование показало возможность улучшения существующего метода расчета балок на общую устойчивость. В статье выдвигается предложение о простой идее перегруппировки коэффициента устойчивости при изгибе и о превращении его в детерминированный для многих случаев (включая балки с переменной высотой стенки).

Ключевые слова: устойчивость, продольный изгиб, изгибно-крутильная устойчивость, переменное сечение, балка, симметричный двутавр, депланация

Для цитирования: Ильюшенков А.О. В развитие нормативного расчета на устойчивость изгибаемых элементов двутаврового постоянного и переменного сечений по СП 16.13330.2017. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):20–39. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-20-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-20-39)

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 07.11.2024

Поступила после рецензирования 26.12.2024

Принята к публикации 16.01.2025

ON THE SP 16.13330.2017 STANDARD STABILITY CALCULATION OF I-TYPE BENDING ELEMENTS WITH CONSTANT AND VARIABLE CROSS-SECTIONS

A.O. ILYUSHENKOV

Khabarovskpromproekt Territorial Design Institute JSC, Ussuriysky Boulevard, 2, Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Abstract

Introduction. The current Russian standards for steel structures, including the SP 16.13330.2017, contain rather limited material in terms of calculating the stability of bending elements. Moreover, these documents provide no information on the calculation of variable cross-section bars for longitudinal and transverse bending, as well as for the stability of such elements. Claimed analytical methods for solving stability problems can offer ever more convenient solutions in addition to numerical analysis.

Aim. To develop a methodology for calculating the stability of bending elements with constant and variable I-sections; to improve the code of rules for steel structures in terms of arch stability.

Materials and methods. The present study includes the determination of coefficients accounting for the variability of the beam cross-section along the length; the Bubnov-Galerkin analytical method is used to consider the effect of the bending moment gradient. An alternative representation of bending-torsional beam characteristics takes into account the height effect of point load application. The obtained analytical solutions are compared in LIRA-SAPR and ABAQUS software packages.

Results. The performed analytical study offers a set of additional coefficients and formulas to support the development of a technique for calculating the stability of bending elements. The solutions are in line with the SP 16.13330.2017. The results of the numerical analysis confirm the obtained analytical solutions.

Conclusions. The present theoretical study has shown the possibility of improving the existing method for calculating the total stability of beams. The paper proposes a simple idea of regrouping the bending stability coefficient and making it deterministic for many cases including beams with a variable web height.

Keywords: stability, longitudinal bending, bending-torsional stability, variable section, beam, symmetrical I-beam, warping

For citation: Ilyushenkov A.O. On the SP 16.13330.2017 standard stability calculation of I-type bending elements with constant and variable cross-sections. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):20–39. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-20-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-20-39)

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 07.11.2024

Revised 26.12.2024

Accepted 16.01.2025

Подготовительная часть

Перед тем как приступить к непосредственному решению обозначенных задач, следует объяснить общие положения расчета. Для решения задачи об изгибаемом стержне, теряющем устойчивость по изгибно-крутильной форме, принимается система двух дифференциальных уравнений [1]. Уравнения определяют условие равновесия при действии закручивающих моментов при отсутствии сжимающей силы:

$$\begin{cases} EI_y \xi^{IV} - M_x \theta'' = 0 \\ EI_\omega^{IV} - GI_t \theta'' - 2\beta_y (M_x \theta')' - M_x \xi'' + q(e_y - a_y) \theta = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где EI_y – наименьшая жесткость балки;

EI_ω – секториальная жесткость (жесткость при деформации);

GI_t – жесткость при кручении;

β_y – свойство асимметрии сечения;

a_y – координата центра изгиба (по оси y);

q – интенсивность нагрузки, параллельной оси y ;

θ – угол закручивания;

ξ – поперечное смещение;

e_y – расстояние по высоте балки, на которой нагрузка прикладывается. Расстояние отсчитывается от центра изгиба и для симметричных профилей. Обычно $e_y = -0,5h$, если нагрузка прикладывается к верхнему поясу, $e_y = +0,5h$, если нагрузка прикладывается к нижнему поясу;

M_x – изгибающий момент или его функция по длине стержня.

В упругой стадии два дифференциальных уравнения устойчивости свободно опертой балки со свободной деформацией конечных сечений при действии нагрузки в плоскости симметрии могут быть приведены к одному. Во втором уравнении из системы двух можно исключить функцию ξ'' , если из первого уравнения выразить:

$$EI_y \xi'' - M_x \theta = 0 \rightarrow \xi'' = \frac{M_x \theta}{EI_y}. \quad (2)$$

Первое уравнение системы из двух (1) может быть понижено в степени на два, исходя из граничных условий. При $x = 0$ и $x = l$ вторая производная угла закручивания $\theta = \theta'' = 0$. В соответствии с этим получим дифференциальное уравнение изгибно-крутильной формы

потери устойчивости шарнирно-опертой балки, нагруженной поперечными силами Q , q и M_x .

$$EI_{\omega}\theta^{IV} - GI_t\theta'' - 2\beta_y(M_x\theta')' - \frac{M_x^2\theta}{EI_y} + qe_y\theta = 0. \quad (3)$$

При этом для профиля, имеющего симметрию относительно оси y - y поперечного сечения, принимается $a_y = 0$.

Дополнительно разберем производную произведения в третьем члене дифференциального уравнения (3). Согласно математическому правилу, производная произведения $(uv)' = u'v + uv'$, поэтому:

$$\begin{aligned} 2\beta_y(M_x\theta')' &= 2\beta_y(M_x'\theta' + M_x\theta'') = 2\beta_yM_x\theta'', \\ EI_{\omega}\theta^{IV} - GI_t\theta'' - 2\beta_yM_x\theta'' - \frac{M_x^2\theta}{EI_y} + qe_y\theta &= 0. \end{aligned} \quad (4)$$

Под интенсивностью нагрузки нужно понимать не просто некоторую распределенную нагрузку q вдоль длины балки, но и возможные поперечные силы Q_{xk} , действующие в точках с абсциссой x_k . Поэтому, используя интеграл Римана – Стильтьеса, мы получим сумму интеграла для распределенной нагрузки q_x и предел суммы поперечных сил Q_{xk} . Так как интеграл Римана – Стильтьеса для функции $f(x)$ по dx есть предел суммы функции $f(x)$ на дельта разность $\Delta_x = x - x_k$, то:

$$qe_y = e_y \left(q_x + \sum_{k=1}^n Q_{xk} \Delta_x \right) = e_y \left(q_x + \sum_{k=1}^n Q_{xk} (x - x_k) \right).$$

С другой стороны, из решения дифференциальных уравнений мы знаем, что вторая производная изгибающего момента $M_x'' = q$, поэтому окончательно записываем:

$$EI_{\omega}\theta^{IV} - GI_t\theta'' - 2\beta_yM_x\theta'' - \frac{\pi^2}{l^2} \frac{M_x^2\theta}{P_y} + M_x''e_y\theta = 0. \quad (5)$$

Если асимметрия в уравнении (5) отсутствует, тогда $\beta_y = 0$:

$$EI_{\omega}\theta^{IV} - GI_t\theta'' - \frac{\pi^2}{l^2} \frac{M_x^2\theta}{P_y} + M_x''e_y\theta = 0. \quad (6)$$

Коэффициент влияния градиента момента C_b

Изгибающий момент по концам стержня в большинстве случаев отличается от чистого изгиба. Являясь наиболее негативным, он, конечно же, предсказывает минимальное значение критического момента M_{cr} , которое можно считать безопасным, но и консервативным в то же самое время. В решаемых на практике задачах всегда поднимались и будут подниматься вопросы, связанные не только с экономией материалов, но и с точностью применяемых решений. На сегодняшний день существует достаточное количество численных формулировок и основанных на этом приближенных решений [2]. Однако точной

аналитической формулировки до сих пор не представлено. Недостаточно иметь формулу, в которой не установлена четкая причинно-следственная связь, поэтому требуется привести такое честное аналитическое решение.

Данная проблема может быть решена при помощи аналитического аппарата метода Бубнова – Галеркина. Метод не только хорошо знаком отечественному инженеру, но и широко принят в решении большого числа задач устойчивости СП 16.13330.2017 [3]. Поэтому можно считать, что все дальнейшие действия не приведут к нарушению целостности философии документов [3, 4].

Впервые в 1955 году Сальвадори [5] предложил простую модификацию уравнения Тимошенко [6] для учета эффекта градиента момента путем умножения его на некоторый коэффициент C_b :

$$M_{cr} = C_b \times M_{0cr} = C_b \times \frac{\pi}{l_{ef}} \sqrt{G I_t E I_y \left(1 + \frac{\pi^2}{\alpha} \right)}, \quad (7)$$

где M_{0cr} – критический изгибающий момент при чистом изгибе;

C_b – коэффициент градиента изгибающего момента для всех случаев, кроме чистого изгиба.

Для дальнейшей работы потребуется определить функцию изменения изгибающего момента по длине балки, показанной на рис. 1. При линейном изменении изгибающего момента следует использовать следующую зависимость:

$$M_x = (M_A + M_B) \frac{x}{l} - M_A = M_A \left(\frac{x}{l} (1+k) - 1 \right), \quad (8)$$

где $k = \frac{M_B}{M_A}$ – отношение изгибающих моментов на концах стержня, которое изменяется в границах $-1 \leq k \leq 1$, $k = -1$ соответствует чистому изгибу.

При решении задачи устойчивости методом Бубнова – Галеркина в общем случае принимается некоторый степенной ряд, отождествляемый с формой потери устойчивости:

$$y = \sum_{i=1}^n A_i \varphi_i(x), \quad (9)$$

где A_i – неизвестные постоянные коэффициенты;

$\varphi_i(x)$ – функция, удовлетворяющая граничным условиям задачи.

Для рассматриваемого случая (рис. 1), когда концы балки могут свободно закручиваться, для задания формы потери устойчивости предлагается традиционная синусоидальная зависимость для угла закручивания θ с n -количеством волн:

$$\theta = A_1 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) + A_3 \sin\left(3 \frac{\pi x}{l}\right) +$$

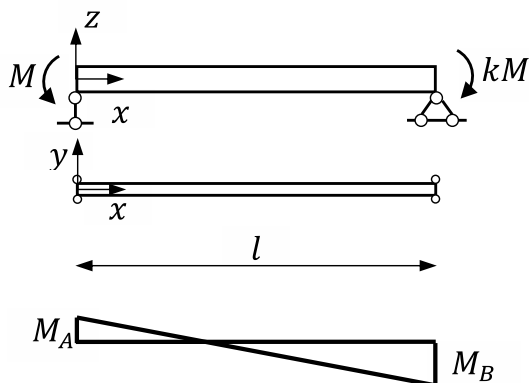


Рис. 1. Шарнирно-опертая балка, подверженная действию разных концевых изгибающих моментов
Fig. 1. A simply supported beam under various end bending moments

$$+ A_5 \sin\left(5 \frac{\pi x}{l}\right) \dots A_{n+1} \sin\left((n+1) \frac{\pi x}{l}\right). \quad (10)$$

Числа n необязательно брать нечетными. Однако для последующих математических операций при удержании второго члена выгодно использовать нечетную функцию. Это позволит сократить количество слагаемых при неизвестных коэффициентах A_1 и A_3 и упростить раскрытие определителя матрицы.

Если $\theta(x)$ – точное решение задачи, то уравнение (6) будет равно нулю. Следовательно, функция в левой части этого уравнения будет ортогональной к любой функции, в том числе и к функциям (10) [7].

$$\left(EI_{\omega} \theta^{IV} - GI_t \theta'' - \frac{\pi^2}{l^2} \frac{M_x^2 \theta}{P_y} + M_x'' e_y \theta \right) \phi_i(x) dx = 0. \quad (11)$$

Сейчас и в дальнейшем ограничим ряд двумя первыми членами. И так как дифференциальное уравнение содержит производные второго и четвертого порядков (10), то:

$$\theta'' = -A_1 \times \frac{\pi^2}{l^2} \times \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) - A_3 \times 9 \frac{\pi^2}{l^2} \times \sin\left(3 \frac{\pi x}{l}\right), \quad (10a)$$

$$\theta^{IV} = A_1 \times \frac{\pi^4}{l^4} \times \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) + A_3 \times 81 \frac{\pi^4}{l^4} \times \sin\left(3 \frac{\pi x}{l}\right). \quad (10б)$$

При этом вторая производная момента для (8) $M_x'' = 0$.

Сделаем попытку решить уравнение (11), используя только первый член ряда. Это приведет к возможности вычислять интегралы без необходимости составления определителя, так как рассматривается только одно алгебраическое уравнение. При этом неизвестный коэффициент A_1 при подстановке функций (10a, б) в уравнение (11) сократится.

$$\int_0^l \left(EI_{\omega} \frac{\pi^4}{l^4} \times \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) - GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \times \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) - \frac{\pi^2}{l^2} \frac{M_x^2}{P_y} \left(\frac{x}{l}(1+k) - 1 \right)^2 \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) \right) \sin\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx = 0. \quad (12)$$

Вначале решаем часть уравнения, которая не связана с изгибающим моментом M_x . Для постоянного сечения интегралы секториальной и крутильной жесткостей решаются таблично с понижением степени:

$$\int_0^l \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx = 0,5 \int_0^l \frac{1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{l}\right)}{2} dx = 0,5l, \\ \int_0^l EI_{\omega} \frac{\pi^4}{l^4} \times \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx + \int_0^l GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \times \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx = \frac{l}{2} GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \left(\frac{EI_{\omega}}{GI_t} \frac{\pi^2}{l^2} + 1 \right) = \frac{l}{2} GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \left(1 + \frac{\pi^2}{a} \right), \quad (13)$$

где a – нормативный обозначаемый коэффициент изгибно-крутильной характеристики балки.

Интеграл дифференциального уравнения (11), содержащий изгибающий момент M_x , решается значительно сложнее. Кроме понижения степени следует выполнить подстановку $u = \frac{x}{l}(1+k) - 1$, $dx = \frac{l}{1+k} du$. Затем произведения функций интегрируем по частям. В конечном итоге будет получена квадратичная функция. Для упрощения интегралы решаются, например,

при помощи MATHCAD. Для удобства выделим отдельно и обозначим через произвольный коэффициент:

$$a_3 = \int_0^l \left(\frac{x}{l}(1+k) - 1 \right)^2 \times \sin^2 \left(\frac{\pi x}{l} \right) dx = \frac{l}{2} (0,283k^2 - 0,433k + 0,283). \quad (14)$$

Тогда решение интеграла, содержащего функцию изменения изгибающего момента M_x по длине стержня:

$$-\frac{\pi^2}{l^2} \frac{M_A^2}{P_y} \int_0^l \left(\frac{x}{l}(1+k) - 1 \right)^2 \times \sin^2 \left(\frac{\pi x}{l} \right) dx = -\frac{\pi^2}{l^2} \frac{M_A^2}{P_y} a_3. \quad (15)$$

Собираем решения (13) и (15) воедино и выражаем изгибающий момент M_A . При этом учтем, что в критической границе изгиба балки $M_{cr} = M_A$, поэтому:

$$M_{cr} = \sqrt{\frac{1}{a_3}} \times \frac{\pi}{l} \sqrt{G I_t E I_y \left(1 + \frac{\pi^2}{\alpha} \right)} = C_b \times \frac{\pi}{l} \sqrt{G I_t E I_y \left(1 + \frac{\pi^2}{\alpha} \right)}, \quad (16)$$

$$C_b = \sqrt{\frac{1}{a_3}}. \quad (17)$$

Проанализируем полученную функцию $C_b(k)$. Для этого построим график (рис. 2) « $k - C_b(k)$ » в границе $-1 \leq k \leq 1$. Максимальное значение $C_b = 2,92$ достигается при $k = 0,75$. Коэффициент C_b всегда больше единицы. Критический момент будет увеличиваться, а значит и устойчивость стержня будет повышена. Пунктиром на графике показана возможная аппроксимация уравнения (17).

Точная формулировка коэффициента изменения изгибающего момента по длине балки:

$$C_b(k) = \sqrt{\frac{1}{a_3}} = \sqrt{\frac{1}{0,283k^2 - 0,433k + 0,283}}. \quad (18a)$$

Приближенная формулировка образует нижнюю границу точного решения с выделением плато при $k \geq 0,5$:

$$C_b(k) = \frac{1}{0,58 - 0,42k} \leq 2,7, \quad (18b)$$

при $0,5 \leq k \leq 1$, $C_b = 2,7$.

Тогда упругий коэффициент продольного изгиба балки φ_1 , согласно СП 16.13330.2017 [3], для любого сочетания изгибающих моментов, приложенных на концах балки:

$$\varphi_1 = \frac{I_y}{I_x} \left(\frac{h}{l_{ef}} \right)^2 \frac{E}{R_y} \times C_b \frac{\Psi_0}{\gamma_c}, \quad (19)$$

где $\Psi_0 = \frac{\pi}{4} \sqrt{\alpha + \pi^2}$ – функция от α при чистом изгибе;

C_b – коэффициент изменения изгибающего момента по длине;

$\gamma_c = 1,15$ – коэффициент условий работы, учитывающий влияние геометрических несовершенств и принимаемый согласно [4, п. 7.2.2].

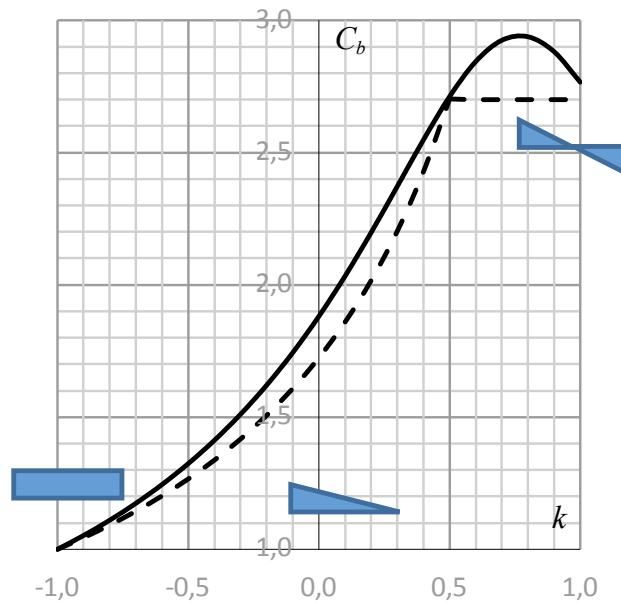


Рис. 2. График зависимости « $k - C_b(k)$ » коэффициента градиента изгибающего момента C_b
 Fig. 2. Dependence $k - C_b(k)$ for the bending moment gradient coefficient C_b

Произведем проверку полученного аналитического решения для градиента момента C_b по (18a). Для этого исследуем балку из двутавра 40Б1 длиной 5 м по ГОСТ Р 57837-2017 [8] в программном комплексе ЛИРА-САПР.

Расчетные характеристики балки: $EI_y = 2,06 \times 1446,9 = 2980,6 \text{ кНм}^2$, $EI_\omega = 110,4 \text{ кНм}^4$. Нормы [3] рекомендуют принимать коэффициент при моменте инерции сечения при свободном кручении для двутаврового сечения с двумя осями симметрии $k_1 = 1,29$.

$$I_t = \frac{1,29}{3} (2 \times 19,9 \times 1,1^3 + 37,4 \times 0,7^3) = 28,3 \text{ см}^4.$$

Модуль сдвига

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{206\,000}{2(1+0,3)} = 79\,231 \text{ МПа}.$$

$$GI_t = 21,1 \text{ кНм}^2.$$

Критический изгибающий момент при чистом изгибе:

$$M_{0cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{GI_t \times EI_y \left(1 + \frac{EI_\omega \pi^2}{GI_t l^2} \right)} = \frac{\pi}{5} \sqrt{21,1 \times 2980,6 \left(1 + \frac{110,4 \pi^2}{21,1 \cdot 5^2} \right)} \approx 276 \text{ кНм}.$$

Далее путем умножения на коэффициент C_b получим диапазон значений критического момента M_{cr} по условию (16).

Значения коэффициента C_b , полученные численным способом, были вычислены следующим образом. Для каждого из случаев k от -1 до 1 , с шагом $0,25$ был определен коэффициент запаса устойчивости, по которому было найдено критическое значение изгибающего момента M_{cr} . Коэффициент влияния момента определялся из уравнения:

Таблица 1

Сравнительная таблица значений критического момента M_{cr} шарнирно-опертой балки 40B1, $l = 5$ м

Table 1

Comparison of critical moment M_{cr} values for a 40B1 simply supported beam, 40B1, $l = 5$ m

k	C_b		M_{cr} , кНм	
	ЛИРА-САПР	(18a)	$C_b \times M_{0cr}$ (16)	ЛИРА-САПР
-1	1,00	1,00	276	284
-0,75	1,14	1,14	315	324
-0,5	1,32	1,32	365	375
-0,25	1,56	1,56	432	442
0	1,86	1,88	519	527
0,25	2,23	2,28	629	632
0,5	2,62	2,70	745	744
0,75	2,88	2,92	805	818
1	2,75	2,74	757	782

$$C_b(k) = \frac{M_{cr}(k)}{M_{0cr}(k = -1)}.$$

При расчете в ЛИРА-САПР следует обращать внимание на выбор конечного элемента стержня и признак схемы. Если проверка стержня на устойчивость выполняется с признаком схемы 5, то секториальная жесткость EI_ω не будет учтена. А формула, по которой вычисляется критический момент, соответствует уравнению:

$$M_{cr} = \frac{\pi}{l} \sqrt{GI_t EI_y}.$$

Для учета EI_ω расчеты следует производить с признаком схемы 6. Конечный элемент стержня с КЭ10 (по умолчанию) следует изменить на КЭ7. КЭ7 позволяет учитывать би-момент и создан для проверки в том числе и тонкостенных конструкций. Только в этом случае коэффициент запаса будет посчитан в полной степени.

Для сравнения результаты численного анализа и аналитического расчета сведем в табл. 1. Аналитическое решение, полученное при помощи метода Бубнова – Галеркина с одним членом ряда $\sin\left(\frac{\pi x}{l}\right)$, совпадает с численным расчетом полностью.

Учет переменности поперечного сечения балки по длине

Учет переменности по своему решению похож на вычисления, сделанные для коэффициента C_b . Будем считать, что ширина балки остается постоянной. Меняется только высота стенки.

Вначале потребуется определить функции изменения жесткости депланации и жесткости при кручении. В силу симметрии двутавра $I_\omega = 0,25 I_y h^2$ можно предложить аналогичный I_y квадратичный закон изменения жесткости по длине и для секториальной жесткости I_ω :

$$EI_{\omega,x} = EI_{\omega,1} \left(1 - a \frac{x}{l} \right)^2, \quad (20)$$

$$\text{где } t_1 = \sqrt{\frac{EI_{\omega,0}}{EI_{\omega,1}}}, \quad a = 1 - \sqrt{\frac{EI_{\omega,0}}{EI_{\omega,1}}} = 1 - t_1;$$

$EI_{\omega,1}$ – максимальная секториальная жесткость;

$EI_{\omega,0}$ – минимальная секториальная жесткость.

Изменение EI_y по длине стержня остается практически постоянным для двутавров с постоянной шириной полков, поэтому в целях экономии времени безопасно принимать постоянное значение. Используя это правильно $EI_{y,0} = EI_{y,1}$, можно определить другое свойство t_1 :

$$t_1 = \sqrt{\frac{0,25EI_{y,0}h_0^2}{0,25EI_{y,1}h_1^2}} = \sqrt{\frac{h_0^2}{h_1^2}} = \frac{h_0}{h_1}. \quad (21)$$

То есть функция изменения секториальной жесткости профиля (20) зависит только от высоты профиля на опорах. Для сварных двутавров $h - t_f$ – это расстояние между поясами. Для прокатных двутавров h – это полная высота профиля.

Решение интеграла секториальной жесткости в уравнении (11):

$$EI_{\omega,1} \frac{\pi^4}{l^4} \int_0^l \left(1 - (1 - t_1) \frac{x}{l} \right)^2 \sin^2 \left(\frac{\pi x}{l} \right) dx = EI_{\omega,1} \frac{\pi^4}{l^4} \frac{l}{2} \times a_1, \quad (22)$$

где $a_1 = 0,283t_1^2 + 0,433t_1 + 0,283$; $0,283 \leq a_1 \leq 1$; $0 \leq t_1 \leq 1$; a_1 – коэффициент учета переменности при секториальной жесткости. Функцию можно аппроксимировать и привести к линейному алгебраическому уравнению. Однако потребуется ограничить границы t_1 до практических.

Как и для секториальной жесткости, составим закон изменения крутильной жесткости по длине. Ввиду того, что крутильная жесткость формируется из набора пластинок, закон изменения жесткости может представлять собой простую линейную зависимость следующего вида:

$$I_{t,x} = I_{t,1} \left(1 - \left(1 - \frac{I_{t,0}}{I_{t,1}} \right) \frac{x}{l} \right) = I_{t,1} \left(1 - (1 - t_2) \frac{x}{l} \right). \quad (23)$$

Решение интеграла жесткости при закручивании (11):

$$GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \int_0^l \left(1 - (1 - t_2) \frac{x}{l} \right) \sin^2 \left(\frac{\pi x}{l} \right) dx = GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \frac{l}{2} \left(\frac{t_2 + 1}{2} \right) = GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \frac{l}{2} a_2, \quad (24)$$

где $a_2 = \frac{t_2 + 1}{2}$ – коэффициент учета переменности при жесткости кручения;

$$t_2 = \frac{I_{t,0}}{I_{t,1}};$$

$I_{t,0}$ – минимальная крутильная жесткость;

$I_{t,1}$ – максимальная крутильная жесткость.

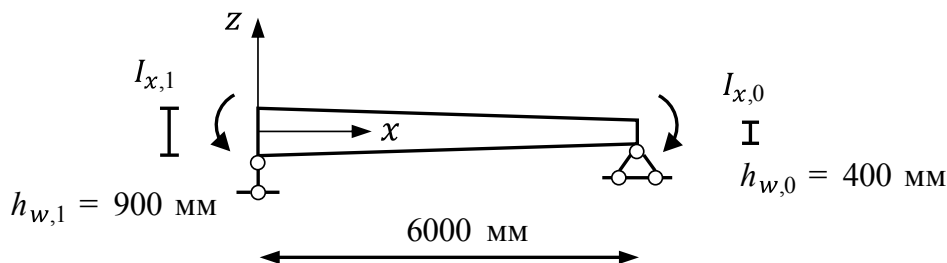


Рис. 3. Исследуемая балка переменного сечения
 Fig. 3. Studied variable cross-section beam

Если переменность заключена только в коэффициентах a_1 и a_2 , удерживается только первый член ряда в методе Бубнова – Галеркина, тогда (22) и (24) интегрального решения дифференциального уравнения (11) складываются в характеристику балки переменного сечения:

$$EI_{\omega,1} a_1 \frac{\pi^4}{l^4} \times \frac{l}{2} + GI_{t,1} a_2 \frac{\pi^2}{l^2} \times \frac{l}{2} = GI_{t,1} \frac{\pi^2}{2} \times \frac{l}{2} \left(a_2 + a_1 \frac{\pi^2}{\alpha} \right). \quad (25)$$

По мере приближения переменного сечения к постоянному (от конического к призматическому) оба коэффициента будут стремиться к единице $a_1, a_2 \rightarrow 1$. И при постоянном сечении изгибно-крутильная жесткость вернется к своему изначальному выражению (13). А так как часть дифференциального уравнения (11), включающая в себя изгибающий момент M_x , уже рассмотрена, можно собрать уравнение критического момента для стержня переменной жесткости воедино:

$$M_{cr} = C_b \frac{\pi}{l} \sqrt{GI_t \times EI_y \left(a_2 + a_1 \frac{\pi^2}{\alpha} \right)}. \quad (26)$$

Таким образом, из (26) заключаем, что переменность шарнирно-опертой балки с учетом депланации и действующих изгибающих моментов на концах стержня определяется двумя редуцированными коэффициентами a_1 и a_2 .

В качестве примера исследуем двутавровый сварной профиль, показанный на рис. 3, со следующими принятыми геометрическими размерами: $t_f = 20$ мм, $b_f = 200$ мм, $h_{w,1} = 900$ мм, $h_{w,0} = 400$ мм, $t_w = 8$ мм. Пролет балки составляет $l = 6000$ мм.

Подсчитываем необходимые характеристики сечений двутавра на опорах.

$$EI_{y,0} = 2,06 \times 2668 = 5497 \text{ кНм}^2.$$

$$EI_{y,1} = 2,06 \times 2671 = 5501 \text{ кНм}^2.$$

$$EI_{\omega,0} = EI_y \frac{(h - t_f)^2}{4} = 2,06 \times 2668 \frac{0,42^2}{4} = 242,3 \text{ кНм}^4.$$

$$EI_{\omega,1} = EI_y \frac{(h - t_f)^2}{4} = 2,06 \times 2668 \frac{0,92^2}{4} = 1162,9 \text{ кНм}^4.$$

$$t_1 = \frac{h_0}{h_1} = \frac{42}{92} = 0,456.$$

$$a_1 = 0,283 \times 0,456^2 + 0,433 \times 0,456 + 0,283 = 0,54.$$

$$I_{t,0} = \frac{1}{3} (2 \times 20 \times 2^3 + 40 \times 0,8^3) = \frac{1}{3} (320 + 46,08) = 122 \text{ см}^4.$$

$$t_2 = \frac{I_{t,0}}{I_{t,1}} = \frac{113,5}{122} = 0,93.$$

$$GI_{t,1} = 0,8 \times 122 = 97,6 \text{ кНм}^2.$$

$$a_2 = \frac{t_2 + 1}{2} = \frac{0,93 + 1}{2} = 0,965.$$

$$M_{0cr} = \frac{\pi}{6} \sqrt{97,6 \times 5501 \left(0,965 + 0,540 \frac{1162,9}{97,6} \frac{\pi^2}{6^2} \right)} = 633 \text{ кНм}.$$

Для такой же балки, но постоянного сечения при высоте стенки $h_{w,1} = 900 \text{ мм}$, $M_{0cr} = 784 \text{ кНм}$. Уменьшение критического момента из-за переменности составляет 20 %.

Для проверки формулы (26) создадим конечно-элементную модель балки в программном комплексе ABAQUS. Материал балки бесконечно упругий. Модуль упругости $E = 206\,000 \text{ МПа}$. Коэффициент Пуассона $\nu = 0,03$. Тип конечного элемента оболочки – S4R, Quad-Dominated Structured. Размер конечного элемента принят 25 мм. Тип расчета: Linear Perturbation – Buckle. На рис. 4 показана конечно-элементная модель балки и форма потери устойчивости при чистом изгибе. Пробные расчеты показали, что размер конечного элемента в 25 мм показывает идентичные результаты критического момента M_{cr} , как и при частой сетке в 10 мм. Кинематика балки приведена на рис. 5. На опорах нижний пояс балки имеет закрепление по Z. Верхний пояс закреплен от смещения поперек по оси Y. Дополнительно задана связь одного конечного элемента по X. Для исключения искажения торцов балки и появления более высоких мод местной формы потери устойчивости на опорах были смоделированы ребра жесткости толщиной 10 мм. Для чистого изгиба по концам в точках приложены пары сил со значениями $-0,5$ слева и $0,5$ справа. Остаточные напряжения не прикладывались. Геометрическое несовершенство не вводилось.

В целях апробации уравнения (26) момент на левом конце балки варьировался. По результатам численного расчета составлена сравнительная табл. 2.

Несмотря на удовлетворительные результаты расчетов, приведем дополнительное решение с удержанием двух членов ряда в короткой форме записи. При удержании второго члена при решении задачи методом Бубнова – Галеркина приходим к системе из двух алгебраических уравнений с неизвестными постоянными A_1 и A_3 :

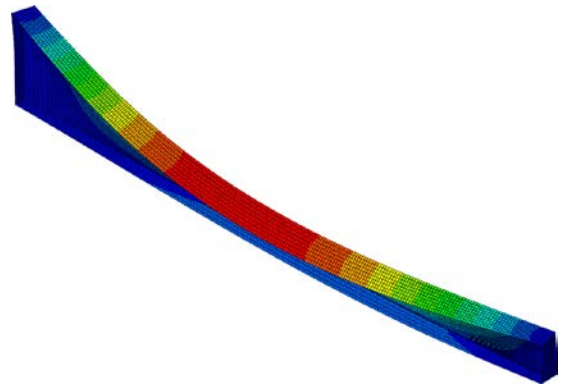


Рис. 4. Конечно-элементная модель и потеря устойчивости балки переменного сечения в ABAQUS
Fig. 4. ABAQUS finite element model and buckling of a variable cross-section beam

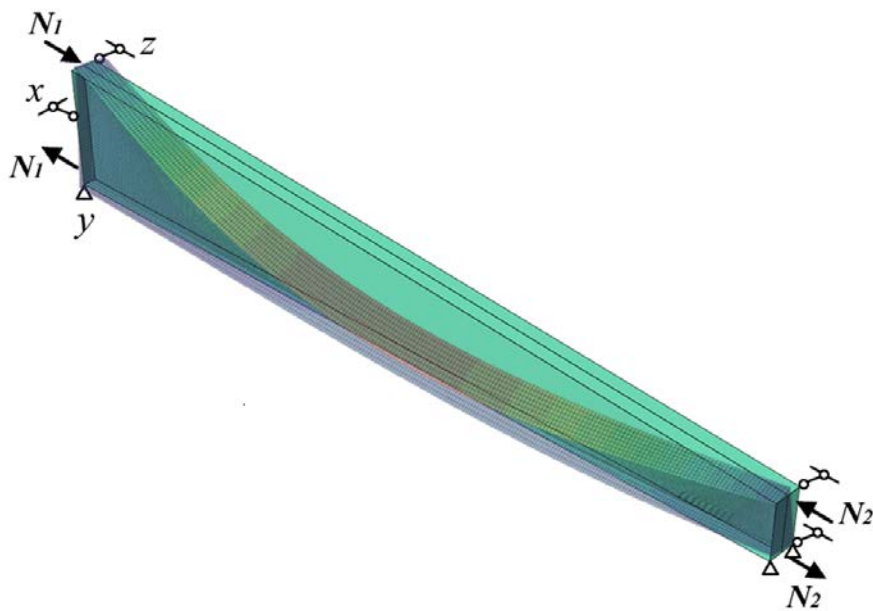


Рис. 5. Кинематика балки
Fig. 5. Beam kinematics

Таблица 2
Сравнительная таблица результатов аналитического и численного расчетов балки
переменного сечения

Table 2
Comparison of analytical and numerical solution results for a variable cross-section beam

<i>k</i>	<i>C_b</i>	(26) <i>C_b M_{0cr}</i> , кНм	ABAQUS <i>M_{cr}</i> , кНм
–1	1	633	562
–0,5	1,32	835	710
0	1,86	1177	1020

$$\begin{cases} A_1 \left(a_2 + a_1 \frac{\pi^2}{\alpha} - \frac{M_x^2}{EI_y GI_t} \frac{l^2}{\pi^2} \right) + A_3 \left(81 \frac{3(t_1 - 1)^2}{8\pi^2} \frac{\pi^2}{\alpha} \right) = 0 \\ A_1 \frac{\pi^2}{\alpha} \frac{3(t_1 - 1)^2}{8\pi^2} + A_3 \left(81 \frac{\pi^2}{\alpha} a_3 + 9a_2 - \frac{M_x^2}{EI_y GI_t} \frac{l^2}{\pi^2} \right) = 0 \end{cases}, \tag{27}$$

где $a_3 = 0,328t_1^2 + 0,345t_1 + 0,328$ – новая дополнительная функция.
При неизвестных в системе уравнений (27) составляем определитель 2×2 :

$$\begin{vmatrix} a_2 + a_1 \frac{\pi^2}{\alpha} - \frac{M_x^2}{EI_y GI_t} \frac{l^2}{\pi^2} & 81 \frac{3(t_1 - 1)^2}{8\pi^2} \frac{\pi^2}{\alpha} \\ \frac{\pi^2}{\alpha} \frac{3(t_1 - 1)^2}{8\pi^2} & 81 \frac{\pi^2}{\alpha} a_3 + 9a_2 - \frac{M_x^2}{EI_y GI_t} \frac{l^2}{\pi^2} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} B_1 - \frac{M_x^2}{EI_y GI_t} \frac{l^2}{\pi^2} & 81\sqrt{C_1} \\ \sqrt{C_1} & B_2 - \frac{M_x^2}{EI_y GI_t} \frac{l^2}{\pi^2} \end{vmatrix} = 0,$$

вводим сокращенные обозначения:

$$B_1 = a_2 + a_1 \frac{\pi^2}{\alpha}, B_2 = 81 \frac{\pi^2}{\alpha} a_3 + 9a_2, C_1 = \frac{9(t_1 - 1)^4}{64\pi^4} \frac{\pi^4}{\alpha^2}, C_2 = 81C_1.$$

Раскрываем определитель путем перемножения левой и правой диагоналей по следующему правилу:

$$\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{vmatrix} = a_{11}a_{22} - a_{12}a_{21} = 0.$$

Опуская математические операции, получим полное квадратное уравнение, наименьший корень которого:

$$M_{cr}^2 = EI_y GI_t \frac{\pi^2}{l^2} \left(\left(\frac{B_2 + B_1}{2} \right) - \sqrt{\left(\frac{B_2 + B_1}{2} \right)^2 - (B_1 B_2 - C_2)} \right). \quad (28)$$

Очевидно, что при удержании двух и более членов ряда коэффициент C_b неизбежно оказывается связан с коэффициентом α . При этом, как это было показано в работах Чувикина [9] и Броуде [10], уточнения коэффициента C_b для шарнирно-опертых балок не происходит. В целях проверки и сравнения (26) и (28) дополнительно были посчитаны еще три балки. Отличия в коэффициентах a_1 и a_2 составляют сотые доли. Поэтому можно считать, что расчеты с удержанием только первого члена оказываются достаточно точными. Также следует уточнить, что большую точность возможно получить, если учесть точную форму прогиба стержня с переменной высотой стенки. Расхождение результатов критического момента между формулой (26) и расчета в ABAQUS объясняется принятием в качестве базисной функции тригонометрического ряда синуса. С ростом переменности линия прогиба становится явно асимметрична относительно середины пролета и максимальное значение смещается в сторону наименьшего поперечного сечения. Поэтому данный способ следует считать приближенным. Применимость формулы (26) должна ограничиваться умеренным углом наклона поясов $\beta = 3-4^\circ$. При большем угле наклона поясов необходимо искать другую базисную функцию, способную отражать асимметричность.

Альтернативная репрезентация ψ в формуле коэффициента продольного изгиба φ_1

Решим нормативную задачу для равномерно распределенной нагрузки, приложенной к верхней (сжатой) полке шарнирно-опертой балки. Используем следующие подстановки:

$$M_x = \frac{q}{2}(lx - x^2), M_x'' = \frac{q^2}{4}(lx - x^2)^2, M_x'' = q, e_y = -0,5h.$$

Решения интегралов, не связанные с внешними воздействиями, остаются прежними по (13). Выполним подстановку M_x , M_x'' и M_x'' в уравнение (5), удерживая только первый член ряда (10):

$$\begin{aligned} 2\frac{\pi^2}{l^2}\beta_y \int_0^l \frac{q}{2}(lx - x^2) \times \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx - \frac{\pi^2}{l^2} \frac{1}{P_y} \frac{q^2}{4} \int_0^l (lx - x^2)^2 \times \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx + q e_y \int_0^l \sin^2\left(\frac{\pi x}{l}\right) dx = \\ = ql \times \beta_y \left(\frac{\pi^2 + 3}{12}\right) - \frac{q^2 l^3}{4} \frac{1}{P_y} \left(\frac{\pi^4 + 45}{60\pi^2}\right) + \frac{ql}{2} e_y. \end{aligned} \quad (29)$$

Суммируем решения интегралов, соединяя воедино (13) и (29):

$$-q^2 \frac{l^2}{P_y} \left(\frac{\pi^4 + 45}{120\pi^2}\right) + q \left(\beta_y \left(\frac{\pi^2 + 3}{6}\right) - e_y\right) + P_y \frac{h^2}{4} \frac{\pi^2}{l^2} \left(1 + \frac{\alpha}{\pi^2}\right) = 0. \quad (30)$$

Складывая полученные части после интегрирования, приходим к полному квадратному уравнению, где за неизвестное принимаем равномерно распределенную нагрузку q . Так как критический момент всегда должен быть больше нуля $M_{cr} > 0$, то для последующего изучения упругой формы потери устойчивости балки под действием q следует оставить только положительный корень:

$$q = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a} = \frac{\left(\beta_y \left(\frac{\pi^2 + 3}{6}\right) - e_y\right) + \sqrt{\left(\beta_y \left(\frac{\pi^2 + 3}{6}\right) - e_y\right)^2 + 4 \frac{l^2}{P_y} \left(\frac{\pi^4 + 45}{120\pi^2}\right) P_y \frac{h^2}{4} \frac{\pi^2}{l^2} \left(1 + \frac{\alpha}{\pi^2}\right)}}{\frac{2l^4}{\pi^2 EI_y} \left(\frac{\pi^4 + 45}{120\pi^2}\right)}. \quad (31)$$

Коэффициент при q обозначим, как и в нормах, через B . Коэффициент B – это коэффициент, учитывающий место приложения внешней поперечной нагрузки q или Q по высоте поперечного сечения h и асимметрию поперечного сечения β_y . Учитывая, что реалистично нагрузки прикладываются либо к верхнему, либо к нижнему поясу, а промежуточные значения остаются достаточно редкими, будем считать, что $e_y = \pm 0,5h$. Поэтому для рассматриваемого случая:

$$Bh = \left(\frac{\beta_y}{h} \left(\frac{\pi^2 + 3}{6}\right) + \frac{e_y}{h}\right) h = \left(2,145 \frac{\beta_y}{h} \pm 0,5\right) h = 0,5h \left(4,29 \frac{\beta_y}{h} \pm 1\right). \quad (32)$$

Или в сокращенной форме:

$$Bh = 0,5 \left(a_4 \frac{\beta_y}{h} \pm 1\right) h, \quad (33)$$

где a_4 – коэффициент вида поперечной нагрузки;

$\frac{\beta_y}{h}$ – асимметричное свойство поперечного сечения.

Если асимметрия или ее влияние отсутствует либо игнорируется, тогда коэффициент B упрощается до:

$$Bh = \pm e_y h = \pm 0,5h. \quad (34)$$

В подкоренном выражении $4ac$ упрощается до выражения:

$$4ac = 1,187h^2 \left(1 + \frac{\alpha}{\pi^2} \right) = 0,12h^2 (\pi^2 + \alpha). \quad (35)$$

Данная часть уравнения обозначается через коэффициент C и в общем случае всегда записывается как:

$$Ch^2 = a_5 h^2 D, \quad (36)$$

где a_5 – коэффициент, зависящий от вида поперечной нагрузки;

$D = \pi^2 + \alpha$ – константа для любых случаев, крутильная характеристика поперечного сечения.

Знаменатель корня квадратного уравнения $2a$ может быть также приведен к компактному виду:

$$\frac{1}{2a} = 41,04 \frac{EI_y}{l^4}. \quad (37)$$

Учитывая введенные сокращенные обозначения (33), (35) и (36), перепишем (31):

$$q = 41,04 \frac{EI_y}{l^4} \left(Bh + \sqrt{(Bh)^2 + Ch^2} \right) = 41,04 \frac{EI_y h}{l^4} \left(B + \sqrt{B^2 + C} \right). \quad (38)$$

Теперь выражение следует привести к максимальному значению изгибающего момента, то есть к его критическому значению. Для равномерно распределенной нагрузки при шарнирном закреплении балки на концах:

$$M_{cr} = \frac{ql^2}{8} = 41,04 \frac{EI_y h}{l^4} \times \frac{l^2}{8} \left(B + \sqrt{B^2 + C} \right) = 5,13 \frac{EI_y h}{l^2} \left(B + \sqrt{B^2 + C} \right). \quad (39)$$

Критические напряжения для двутавровой симметричной балки [10]:

$$\sigma_{cr} = \frac{M_{cr}}{W_x} = \frac{M_{cr} h}{2I_x},$$

$$\sigma_{cr} = \frac{M_{cr}}{W_x} = 2,565 \frac{EI_y h^2}{I_x l^2} \left(B + \sqrt{B^2 + C} \right). \quad (40)$$

Число 2,565 является другим коэффициентом поперечной нагрузки $A = 2,565$. Тогда окончательно в общей и нормативной формах записи уравнение критического момента потери устойчивости балки при изгибе с кручением:

$$\sigma_{cr} = \frac{EI_y h^2}{I_x l^2} A \left(B + \sqrt{B^2 + C} \right), \quad (41)$$

а коэффициент изгиба с кручением балки в упругой области напряжений:

$$\varphi_1 = \frac{\sigma_{cr}}{\sigma_T} = \frac{EI_y h^2}{I_x I^2 \sigma_T} \frac{\psi}{\gamma_c},$$

где $\psi = \frac{2,565}{1,15} \left(\pm 0,5 + \sqrt{0,25 + 0,12(\pi^2 + \alpha)} \right)$ – изгибно-крутильная характеристика балки.

Теперь создадим альтернативную формулировку коэффициента ψ . Идея репрезентативности ψ заключена в том, чтобы получить общее и интуитивно понятное уравнение, которое будет применительно к любому другому случаю. Как известно, коэффициент ψ ранее был записан в табличной форме [10]. В сегодняшних нормах этот коэффициент был аппроксимирован и приведен в виде полиномиальной зависимости, которая, по правде сказать, достаточно плохо представляется инженеру, потому как теряется причинно-следственная связь вычисления α , но ситуацию можно исправить. Вся проблема заключена лишь в том, что формулы в [3, табл. Ж.1] были составлены как функции $\psi(\alpha)$. В то время как они должны были быть составлены от $\psi(\psi_0) = \psi\left(\frac{\pi}{4}\sqrt{\alpha + \pi^2}\right)$, то есть от чистого изгиба. Не секрет, что такая зависимость будет иметь линейное представление в форме алгебраического уравнения общего вида:

$$\psi = \frac{1}{\gamma_c} (C_b \psi_0 + a_6), \quad (42)$$

где ψ_0 – функция от чистого изгиба;

C_b – коэффициент влияния момента или внешней нагрузки в общем случае;

a_6 – коэффициент, учитывающий место приложения поперечной нагрузки по высоте сечения.

Альтернативная репрезентация способна предоставить больше гибкости в расчетах, как и упростить табл. Ж.1, приведенную в своде правил по стальным конструкциям [3].

При приложении равномерно распределенной нагрузки к верхнему (сжатому) поясу с учетом коэффициента условий работы $\gamma_c = 1,15$:

$$\psi = 1,13 \frac{\psi_0}{\gamma_c} - \frac{1,05}{\gamma_c}. \quad (43)$$

При приложении нагрузки к нижнему поясу (растянутому):

$$\psi = 1,13 \frac{\psi_0}{\gamma_c} + \frac{1,45}{\gamma_c}. \quad (44)$$

Соответственно, если нагрузка прикладывается к оси или центру тяжести поперечного сечения (совпадающего для симметричного двутавра с центром изгиба), тогда следует очевидное:

$$\psi = 1,13 \frac{\psi_0}{\gamma_c}, \quad (45)$$

где $C_b = 1,13$.

В виде неполного квадратного уравнения можно установить влияние приложения нагрузки по высоте сечения по трем точкам. При $e_y = -0,5$, $a_6 = -1,05$. При $e_y = 0$, $a_6 = 0$.

При $e_y = +0,5$, $a_6 = +1,45$. Тогда алгебраическое уравнение, построенное от центра тяжести поперечного сечения:

$$a_6 = 0,8e_y^2 + 2,5e_y, \quad (46)$$

где e_y – ордината приложения нагрузки по высоте сечения в границах $-0,5 < e_y < 0,5$.

Такое неполное уравнение всегда имеет пологий вид на графике (рис. 6), поэтому в целях упрощения уравнение может быть подвергнуто линеаризации.

Для проверки правильности приведенных формул составлена сравнительная табл. 3, где указаны числовые значения ψ в зависимости от параметра α .

Оставляя дальнейшую математическую работу за рамками статьи, для сосредоточенной силы при шарнирном опирании балки:

$C_b = 1,35$, $a_6 = 1,43e_y^2 + 3,76e_y$. Коэффициент приложения нагрузки a_6 возможно упростить и подвести к одному обобщенному выражению для всех случаев. К примеру, нормы США

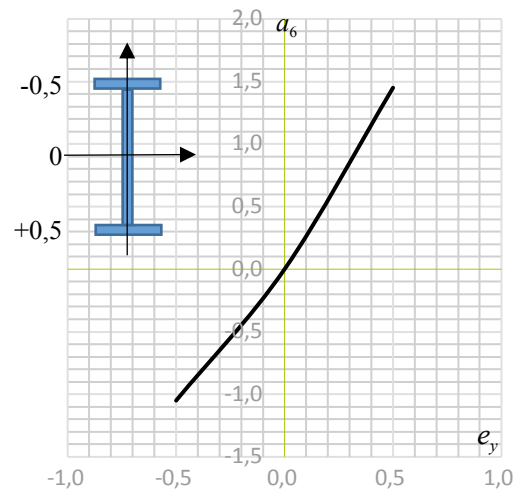


Рис. 6. График зависимости « $a_6 - e_y$ »

Fig. 6. Dependence $a_6 - e_y$

Таблица 3

Сравнительная таблица коэффициента ψ

Table 3

Comparative table of ψ coefficient values

α	Сжатый пояс	Растянутый пояс	Сжатый пояс	Растянутый пояс
	[1, табл. Ж.1]		[43]	[44]
0,1	1,61	3,81	1,52	3,70
0,4	1,63	3,83	1,56	3,73
1	1,68	3,88	1,63	3,80
4	1,92	4,12	1,96	4,13
8	2,24	4,44	2,35	4,52
16	2,88	5,08	3,01	5,18
24	3,52	5,72	3,58	5,75
32	4,16	6,36	4,08	6,25
40	4,80	7,00	4,53	6,71
48	5,01	7,21	4,95	7,13
64	5,60	7,80	5,72	7,89
80	6,18	8,38	6,40	8,57
96	6,74	8,94	7,02	9,20
128	7,83	10,03	8,14	10,32
160	8,86	11,06	9,14	11,31
240	11,19	13,39	11,28	13,45
320	13,19	15,39	13,10	15,27
400	14,83	17,03	14,70	16,88

[2] предлагают упрощенный подход, согласно которому учет места приложения поперечной нагрузки определяется путем модификации коэффициента влияния момента C_b :

$$C_b^* = 1,4^{\left(\frac{2e_y}{h}\right)} C_b. \quad (47)$$

Формула (47) является достаточно приближенным решением, в особенности для равномерно распределенной нагрузки. Однако такая унификация позволяет получить гибкое и универсальное уравнение применительно к широкому набору случаев приложения поперечных нагрузок к балке.

Заключение

Проделанная теоретическая работа позволяет оценить потенциал и возможности по развитию раздела устойчивости изгибаемых элементов, как минимум, двутаврового сечения. Как это было продемонстрировано, аналитические методы решения задач в современной системе проектирования стальных конструкций ни в коем случае нельзя списывать со счетов. Документам [3, 4] есть куда расти. Существует вполне четкая уверенность в возможности развития разделов устойчивости, решении вопросов колонн переменного сечения, изгибно-крутильной формы потери устойчивости и эффективных или расчетных длин.

Список литературы

1. Власов В.З. Тонкостенные упругие стержни. Москва: Физматлит; 1959.
2. ANSI/AISC 360-22. Specification for Structural Steel Buildings [internet]. American Institute of Steel Construction; 2022. Available at: <https://www.aisc.org/globalassets/product-files-not-searched/publications/standards/a360-22w.pdf>.
3. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*. Москва: Минстрой России; 2017.
4. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования. Москва: Минстрой России; 2017.
5. Salvadori M.G. Lateral buckling of I-beams. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1955;120(1). <https://doi.org/10.1061/taceat.00072286>.
6. Тимошенко С.П. Устойчивость упругих систем. Москва: Гостехиздат; 1946.
7. Масленников А.М. Динамика и устойчивость сооружений. Москва: Юрайт; 2017.
8. ГОСТ Р 57837-2017. Двутавры стальные горячекатаные с параллельными гранями полок. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019.
9. Чувикин Г.М. Об устойчивости за пределом упругости внецентренно сжатых тонкостенных стержней открытого профиля. В: Исследования по стальным конструкциям. Москва: Госстройиздат; 1962.
10. Броуде Б.М. Предельные состояния стальных балок. Москва: Стройиздат; 1953.

References

1. Vlasov V.Z. Thin-Walled Elastic Rods. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1959. (In Russian).
2. ANSI/AISC 360-22. Specification for Structural Steel Buildings [internet]. American Institute of Steel Construction; 2022. Available at: <https://www.aisc.org/globalassets/product-files-not-searched/publications/standards/a360-22w.pdf>.

3. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81*. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2017. (In Russian).
4. SP 294.1325800.2017. The construction of steel. Design rules. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2017. (In Russian).
5. *Salvadori M.G.* Lateral buckling of I-beams. Transactions of the American Society of Civil Engineers. 1955;120(1). <https://doi.org/10.1061/taceat.0007228>
6. *Timoshenko S.P.* Stability of Elastic Systems. Moscow: Gostechizdat Publ.; 1946. (In Russian).
7. *Maslennikov A.M.* Dynamics and Stability of Structures. Moscow: Urait Publ.; 2017. (In Russian).
8. State Standard R 57837-2017. Hot-rolled steel I-beams with parallel edges of flanges. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
9. *Chuvikin G.M.* On the stability beyond the elastic limit of eccentrically compressed thin-walled open-section rods. In: Research on steel structures. Moscow: Gosstroizdat Publ.; 1962. (In Russian).
10. *Broude B.M.* The limit states of steel beams. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1953. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Александр Олегович Ильюшенко, инженер промышленного и гражданского строительства, АО «Территориальный проектный институт «Хабаровскпромпроект», Хабаровск
e-mail: revivaltree@gmail.com

Alexander O. Ilyushenkov, Civil and Industrial Engineer, Khabarovskpromproekt Territorial Design Institute JSC, Khabarovsk
e-mail: revivaltree@gmail.com

ПОВЫШЕНИЕ ОГНЕСТОЙКОСТИ И СНИЖЕНИЕ ПОЖАРНОЙ ОПАСНОСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ, ВЫПОЛНЕННЫХ ИЗ СОВРЕМЕННЫХ ДРЕВЕСНЫХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. КОМАРОВА¹, канд. хим. наук
И.А. ГРИШИН¹
Н.О. МЕЛЬНИКОВ^{1,2,✉}, канд. техн. наук
М.В. ШАЛАБИН¹
И.А. ВЛАСКИН²

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

² Российский химико-технологический университет (РХТУ) им. Д.И. Менделеева, Миусская площадь, д. 9, стр. 1, г. Москва, 125047, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Развитие деревянного домостроения требует совершенствования нормативной базы по пожарной безопасности применения строительных конструкций из новых видов древесных материалов, что невозможно без проведения исследований в части огнестойкости и пожарной опасности таких конструкций. Сегодня все большее распространение в строительстве получают новые виды материалов, такие как брус многослойный клееный из шпона (LVL), древесина перекрестноклееная (CLT) и брус многослойный клееный.

Целью настоящей работы является получение достоверных экспериментальных и расчетно-аналитических данных для создания рекомендаций по увеличению пределов огнестойкости и снижению пожарной опасности исследуемых строительных конструкций.

Материалы и методы. В работе методами определения предела огнестойкости по ГОСТ 30247.1-94 и класса пожарной опасности по ГОСТ 30403-2012 проведены испытания строительных конструкций, выполненных из новых видов древесных материалов, с различными облицовками и средствами огнезащиты.

Результаты. Применение облицовок и средств огнезащиты повышает пределы огнестойкости вертикальных и горизонтальных исследуемых деревянных конструкций: до R30 и K0(15) – при применении огнезащитной краски по ГОСТ Р 59274-2020 с расходом 800 г/м² – конструкций ферм, балок, прогонов и опорных колонн бесчердачных покрытий; до R120 и K0(45) – при применении усиленной конструктивной облицовки из гипсокартонного листа (2 листа по 12,5 мм) и негорючих минераловатных плит (толщина 50 мм) – несущих конструкций зданий: ферм, балок, и колонн.

Выводы. Результаты работы предполагается использовать при разработке и совершенствовании нормативных документов в области пожарной безопасности, в развитии дорожной карты деревянного домостроения при разработке нормативных документов, в частности при подготовке изменений в СП 64.13330.2017 «СНиП II-25-80 Деревянные конструкции».

Ключевые слова: деревянное домостроение, деревянные строительные конструкции, облицовочные материалы, средства огнезащиты, огнестойкость, класс пожарной опасности

Для цитирования: Комарова М.А., Гришин И.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В., Власкин И.А. Повышение огнестойкости и снижение пожарной опасности строительных конструкций, выполненных из современных древесных материалов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):40–60. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-40-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-40-60)

Вклад авторов

Комарова М.А. – постановка целей и задач исследования, участие в испытаниях, участие в написании статьи.

Гришин И.А. – разработка плана испытаний, участие в испытаниях, разработка проекта изменений.

Мельников Н.О. – участие в испытаниях, обработка экспериментальных данных, написание статьи.

Шалабин И.А. – подготовка образцов для проведения испытаний, участие в испытаниях, обработка экспериментальных данных.

Власкин И.А. – проведение расчетов и оформление графических зависимостей экспериментальных данных, участие в испытаниях.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.01.2025

Поступила после рецензирования 01.03.2025

Принята к публикации 06.03.2025

INCREASING FIRE RESISTANCE AND REDUCING FIRE HAZARD OF BUILDING STRUCTURES MADE OF ADVANCED WOOD MATERIALS

M.A. KOMAROVA¹, Cand. Sci. [Chem.]

I.A. GRISHIN¹

N.O. MELNIKOV^{1,2✉}, Cand. Sci. [Engineering]

M.V. SHALABIN¹

I.A. VLASKIN²

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

² Mendeleev University of Chemical Technology, Miusskaya Square, 9, bld. 1, Moscow, 125047, Russian Federation

Abstract

Introduction. The development of wooden housing construction requires the improvement of regulatory framework for the fire safety of building structures made from advanced wood materials. This appears impossible without conducting research into the fire resistance and fire hazard of such structures. Advanced wood materials such as laminated veneer lumber (LVL), cross-laminated timber (CLT), and laminated timber become increasingly widespread in construction.

Aim. To obtain reliable experimental and analytical data on developing recommendations for increasing fire resistance limits and reducing fire hazard of the studied building structures.

Materials and methods. The article presents tests of building structures made from advanced wood materials with various claddings and fire protection coatings. The tests were performed using State Standard 30247.1-94 and State Standard 30403-2012 methods for determining the fire resistance limit and fire hazard class.

Results. The use of cladding and fire protection coatings increases the fire resistance limits of the studied vertical and horizontal wooden structures: up to R30 and K0(15) under State Standard R 59274-2020 fire-retardant paint with a consumption of 800 g/m² for trusses, beams, purlins, and column supports of attic-less roofs; up to R120 and K0(45) under reinforced structural cladding made of two 12.5 mm plasterboard sheets and 50 mm non-combustible mineral wool slabs for load-bearing structures of buildings, including trusses, beams, and columns.

Conclusions. We suppose to use the results of the study for the development and improvement of regulatory documents in the field of fire safety, as well as for the development of a roadmap for regulatory documents of wooden housing construction, in particular for preparing amendments to the SP 64.13330.2017 "SNiP II-25-80 Wooden Structures".

Keywords: wooden housing construction, wooden building structures, cladding materials, fire protection, fire resistance, fire hazard class

For citation: Komarova M.A., Grishin I.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Vlaskin I.A. Increasing fire resistance and reducing fire hazard of building structures made of advanced wood materials. *VestnikNIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):40–60. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-40-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-40-60)

Authors contribution statement

Komarova M.A. – setting research goals and objectives, testing, writing the article.

Grishin I.A. – developing a test plan, testing, developing an amendment project.

Melnikov N.O. – testing, processing experimental data, writing the article.

Shalabin I.A. – preparing test samples, testing, processing experimental data.

Vlaskin I.A. – conducting calculations and processing experimental data, testing.

Funding

The study was carried out under the contract between JSC Research Center of Construction and Federal Center for Regulation, Standardization, and Technical Assessment in Construction (FAU "FCC").

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 24.01.2025

Revised 01.03.2025

Accepted 06.03.2025

Введение

Нормативная база РФ в области пожарной безопасности в настоящее время существенно ограничивает область применения деревянных элементов как для ограждающих, так и для несущих конструкций. Эти требования заложены в показателях пожарной опасности строительных материалов и конструкций, которые определяются согласно ФЗ № 123 «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1].

В классификации строительных материалов и конструкций по пожарной опасности существуют недостатки, которые не позволяют отражать реальные условия пожара:

- не определяются такие параметры, как скорость тепловыделения, время достижения максимальной скорости тепловыделения, общее тепловыделение за определенное время, способность к образованию общей вспышки, определение максимального показателя дымообразующей способности и токсичности продуктов горения с учетом режима пожара и продолжительности огневого воздействия;

– существующие параметры пожарной опасности строительных материалов и конструкций не позволяют производить на их основе математическое моделирование пожара для различных сценариев при прогнозировании динамики образования опасных факторов пожара и расчета пожарного риска с учетом физико-химических параметров горения материалов для возможности успешной эвакуации людей на объектах разного функционального назначения;

– отсутствует взаимосвязь действующих нормируемых параметров пожарной опасности строительных материалов и конструкций с расчетом пожарного риска на объектах разного функционального назначения.

При этом зарубежные нормативные требования постоянно меняются в сторону возможности применения эффективных материалов для зданий более высокой этажности. Здания, которые в России могут иметь максимум 3 этажа, в Европе и Северной Америке разрешается строить высотой 8, 9 или даже 16 этажей.

Сегодня в деревянном домостроении развиваются новые технологии, наиболее перспективными из которых являются деревянные конструкции, выполненные из бруса многослойного клееного из шпона (LVL), древесины перекрестноклееной (CLT) и бруса многослойного клееного. СП 64.13330.2017 [2] не содержит исчерпывающий объем данных, необходимых для обеспечения требуемых пределов огнестойкости и классов пожарной опасности таких строительных конструкций.

Таким образом, выполнение работ по рассматриваемой проблеме является важной и актуальной задачей по внедрению эффективных материалов и конструкций в современное строительство в РФ.

Необходимо рассмотреть и экспериментально исследовать действительные пределы огнестойкости указанных конструкций, а также возможности повышения их огнестойкости и снижения пожарной опасности путем применения облицовок и средств огнезащиты.

Целью настоящей работы является получение достоверных экспериментальных и расчетно-аналитических данных для создания рекомендаций по увеличению пределов огнестойкости и снижению пожарной опасности строительных конструкций, выполненных из бруса многослойного клееного из шпона, древесины перекрестноклееной и бруса многослойного клееного (брус), используемых для многоквартирных жилых и общественных зданий.

Материалы и методы

Для выполнения поставленных целей была разработана программа экспериментальных исследований, состоящая из:

– определения пределов огнестойкости образцов конструкций в соответствии с ГОСТ 30247.1-94 [3]. Определяемые предельные состояния: потеря несущей способности, потеря целостности, потеря теплоизолирующей способности;

– определения класса пожарной опасности образцов конструкций в соответствии с ГОСТ 30403-2012 [4]. Пожарную опасность конструкции характеризуют:

– наличием теплового эффекта от горения материалов образца, который выражается в превышении температуры в тепловой камере по сравнению с верхней допустимой границей температурного режима;

- наличием пламенного горения газов, выделяющихся при термическом разложении материалов образца, продолжительностью более 5 с;
- наличием горящего расплава при продолжительности его горения более 5 с;
- размером повреждения образца в контрольной зоне.

Исследования проводились на конструкциях LVL, CLT и бруса с типовыми материалами облицовок и средств огнезащиты. Размеры образцов выбирались как максимально возможные по методикам проводимых испытаний.

Предел огнестойкости определялся для следующих видов конструкций:

- узел крепления главной балки длиной 2,7 м и второстепенной балки длиной 5,2 м, размер сечения 400×180 мм для LVL и 400×200 мм для бруса;
- узел крепления балки длиной 5,2 м и колонны высотой 2,5 м, размер сечения 400×180 мм для LVL и 400×200 мм для бруса;
- фрагмент конструкции стены из CLT с металлическими узлами крепления и примыкания к колонне, а также между панелями размером 3000×3000 мм, толщиной 200 мм. Узел крепления выполнен в виде закладной металлической пластины $100 \times 100 \times 10$ мм, стянутой 4 болтами, утопленными и забитыми заглушками длиной 50 мм.

Узлы крепления испытывались под нагрузкой 5,5 тонн, приложенной в двух точках на каждой $1/3$ длины пролета балки.

Класс пожарной опасности определяли на образцах в виде фрагмента конструкции стены размером 2400×1300 мм и толщиной 180 мм для LVL и 200 мм для CLT и бруса.

Эскизы испытываемых конструкций представлены на рис. 1–4.

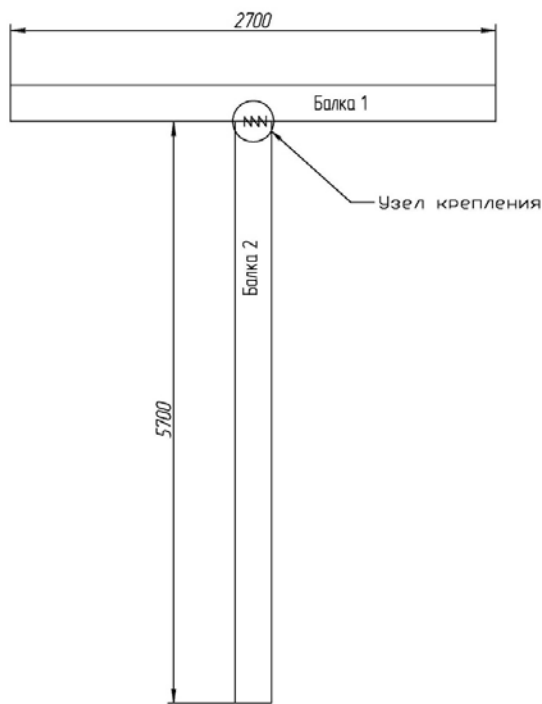


Рис. 1. Узел крепления главной и второстепенной балок

Fig. 1. Main and secondary beam attachment joint

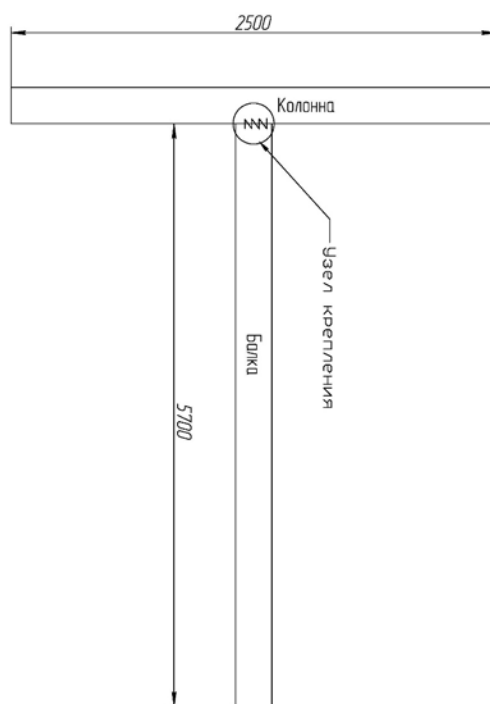


Рис. 2. Узел крепления балки и колонны

Fig. 2. Beam and column attachment joint

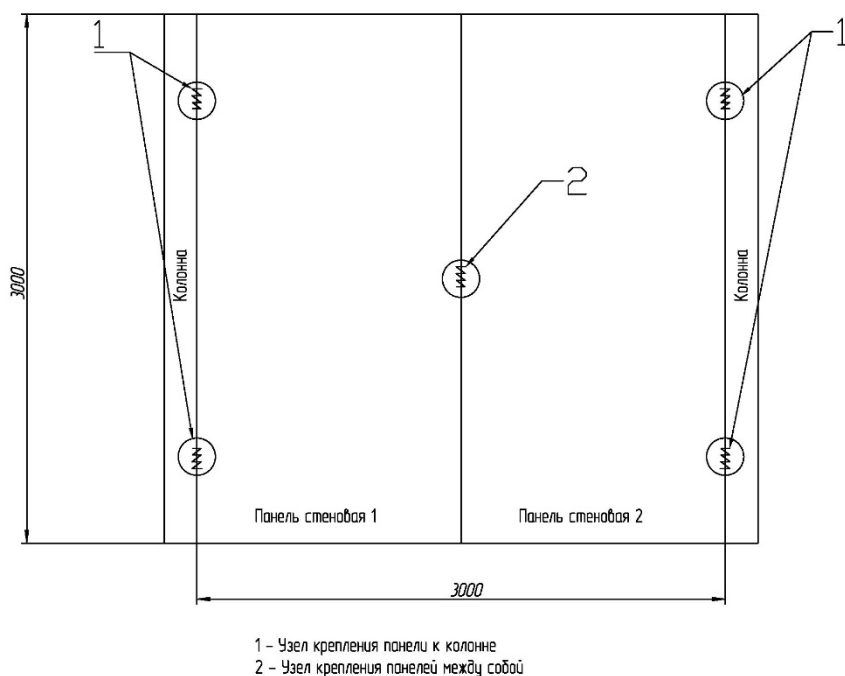


Рис. 3. Фрагмент конструкции стены с металлическими узлами крепления и примыкания к колонне
Fig. 3. Fragment of a wall structure with metal attachment and abutment joints to a column

В качестве облицовок и средств огнезащиты применялись следующие технические решения:

- огнезащитные краски по ГОСТ Р 59274-2020 [5] с расходом 800 г/м²;
- два слоя гипсокартонного листа (ГКЛ) толщиной 12,5 мм, каждый по ГОСТ 6266-97 [6].
- минераловатная плита 50 мм (минплита) и два слоя ГКЛ по ГОСТ 6266-97 [6].

Результаты

В работе проведена серия огневых и расчетно-аналитических исследований по определению фактических пределов огнестойкости и классов пожарной опасности и выработаны технические решения по обеспечению нормативных требований, установленных для данных конструкций, в том числе по применению средств огнезащиты.

На первом этапе необходимо было исследовать собственные пределы огнестойкости

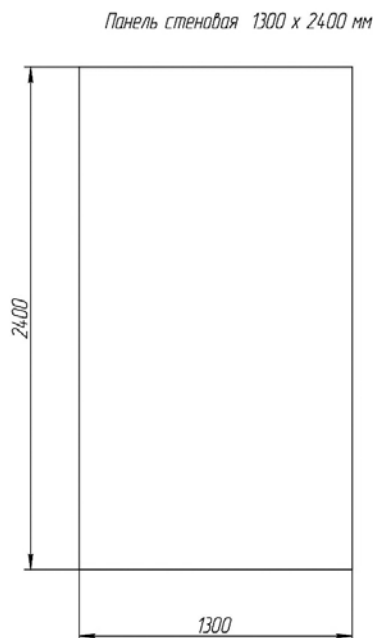


Рис. 4. Фрагмент конструкции стены
Fig. 4. Wall structure fragment

и классы пожарной опасности конструкций без применения огнезащитных материалов и облицовок.

Внешний вид конструкций узлов крепления «балка – балка» и «балка – колонна» перед испытанием представлен на рис. 5.

Внешний вид металлических узлов крепления «балка – балка» и «балка – колонна» представлен на рис. 6.

В результате проведенных испытаний установлено, что потеря несущей способности конструкций наступает при обрушении металлического узла крепления. Среднее время до потери несущей способности составило 23 минуты для всех видов конструкций. Внешний вид металлического узла крепления после проведения испытаний представлен на рис. 7.

Собственные пределы огнестойкости деревянных балок были рассчитаны по уменьшению их сечения в условиях пожара с распределенной нагрузкой 5,5 т, приложенной в двух точках на каждой 1/3 длины пролета. Схема нагружения балок и сечение при расчетах представлены на рис. 8.

Для балок сечением 400×200 мм под вышеуказанной нагрузкой прогиб составляет 5,4 мм, а предельный прогиб – 29,2 мм. При пожаре сечение балки будет уменьшаться со скоростью обугливания 0,7 мм/мин (в соответствии с [2, п. 10.4]), а температура начала обугливания составляет 270°C . Минимальное сечение балки, обеспечивающее прогиб не более 29,2 мм, составляет 90×290 мм, то есть такое сечение при пожаре с момента

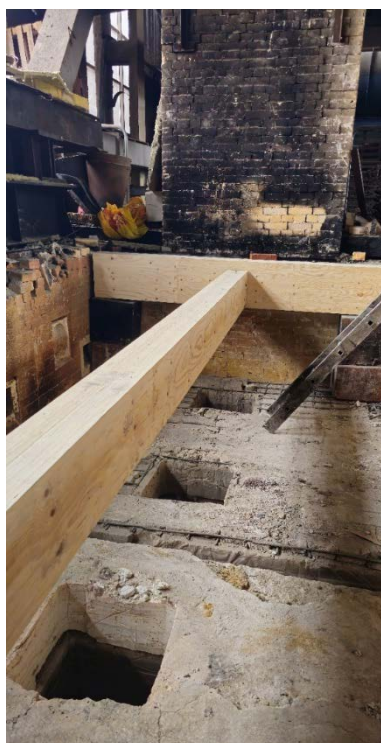


Рис. 5. Внешний вид конструкции узлов «балка – балка» и «балка – колонна»
Fig. 5. Beam-beam and beam-column joints



а (a)



б (b)

Рис. 6. Внешний вид металлического узла крепления конструкций: а – «балка – балка»; б – «балка – колонна»
Fig. 6. Metal attachment joints of structures: a – beam-beam; b – beam-column



Рис. 7. Металлический узел крепления после проведения огневых испытаний
Fig. 7. Metal attachment joint after fire testing

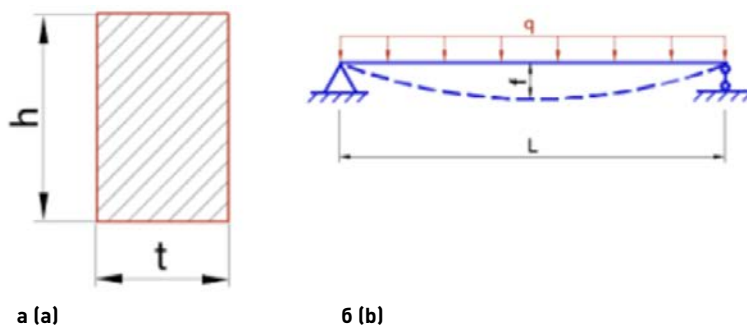


Рис. 8. Схема сечения (а) и нагружения балки (б) при расчетах
Fig. 8. Beam cross-section (a) and loading diagram (b) in calculations

начала обугливания будет через 78 мин, а если учесть время до начала обугливания, то можно принять собственный предел огнестойкости, равный 80 мин.

Для балок сечением 400×180 мм аналогичный расчет дает собственный предел огнестойкости, равный примерно 70 мин.

Таким образом, собственный предел огнестойкости незащищенных деревянных балок больше, чем у металлических узлов их крепления.

В результате проведенных исследований установлено, что предел огнестойкости незащищенных узлов крепления балок и колонн под нагрузкой независимо от вида древесного материала составляет R15 и определяется собственным пределом огнестойкости металлического узлового соединения, если он находится без защиты.

Огнестойкость незащищенного фрагмента конструкции стены из LVL и CLT с металлическим узлом крепления и примыкания к колонне, а также между панелями размером 3000×3000 мм и толщиной 200 мм составил REI 90. При этом стоит отметить, что потеря несущей способности (R) определялась по достижению температуры 500°C на металлических элементах узлов крепления и примыкания, которые были выполнены в виде закладной металлической пластины $100 \times 100 \times 10$ мм, стянутой 4 болтами, утопленными и забитыми заглушками длиной 50 мм, прогрев которых составил 93 мин. Потеря целостности (E) наступила на 97 мин, при этом потеря теплоизолирующей способности (I) не наступила.

Класс пожарной опасности фрагментов конструкции стен из LVL, CLT и бруса размером 2400×1300 мм без применения облицовок и средств огнезащиты составляет КЗ, так как, в соответствии с [2, п. 10.14], незащищенная древесина относится к классу пожарной опасности элементов конструкций КЗ независимо от времени воздействия огня и требуемого предела огнестойкости.

Полученные в результате исследований данные по фактическим пределам огнестойкости строительных конструкций, выполненных из LVL и бруса, в том числе узловых соединений таких конструкций, ограничивают возможность применения незащищенных конструкций и их узловых соединений в строительстве зданий и сооружений многоквартирными жилыми домами, административными, сельскохозяйственными и складскими зданиями с ограниченной площадью этажа в пределах пожарного отсека и высотой не более 1–2 этажей.

Предел огнестойкости фрагмента конструкции несущей стены из CLT с металлическими узлами крепления и примыкания к колонне, а также между панелями составил REI90, что допускает применение таких конструктивных решений в зданиях II степени огнестойкости.

Для строительства зданий до 28 м пределы огнестойкости конструкций и узлов должны соответствовать требованиям [1, табл. 21, 22]:

- R90 (REI90), K0(45) – для несущих конструкций зданий, конструкций лестничных клеток, площадок и лестничных маршей;
- E15, K0 – для конструкций наружных ненесущих стен;
- REI45, K0(45) – для конструкций междуэтажных перекрытий;
- R15, K0(15) – для конструкций ферм, балок и прогонов бесчердачных покрытий.

С целью повышения пределов огнестойкости и классов пожарной опасности незащищенных конструкций и их узлов, исследуемых в настоящей работе, необходимо использование технических решений по их огнезащите. Для этого были проведены испытания облицовок и средств огнезащиты строительных конструкций.

Исследования класса пожарной опасности конструкций

Определялись классы пожарной опасности фрагмента вертикальной конструкции размером 2400 × 1300 мм, толщиной 200 мм для CLT и бруса и 180 мм для LVL, с облицовками и средствами огнезащиты, описанными выше. Внешний вид образцов до испытаний, в процессе и после представлен на рис. 9–17. Результаты испытаний представлены в табл. 1.

Необходимо отметить, что в процессе испытаний образцы с использованием двух листов ГКЛ показали класс K0(30), но их выгорание происходило после испытания в течение суток, поэтому им присвоен класс K3(30), как это предусмотрено ГОСТ 30403-2012 [4].

По результатам испытаний установлено, что вид древесного материала конструкции не влияет на показатели пожарной опасности.

Расчетно-аналитическое обоснование огнестойкости исследуемых конструкций с облицовками и средствами огнезащиты

При проведении огневых испытаний по определению классов пожарной опасности были получены экспериментальные данные для последующих расчетно-аналитических обоснований пределов огнестойкости узлов крепления с облицовками и средствами огнезащиты.

При исследовании фрагментов конструкций с нанесенной огнезащитной краской на класс пожарной опасности были получены профили динамики прогрева поверхности образца под огнезащитной краской (рис. 18).

Таблица 1

Результаты определения класса пожарной опасности конструкций

Table 1

Results of determining the fire hazard class of structures

№	Наименование материала	Средство огнезащиты	Результат
1	LVL, CLT, брус	Без применения	K3
2	LVL, CLT, брус	Огнезащитная краска	K0(15)
3	LVL, CLT, брус	2 листа ГКЛ	K3(30)
4	LVL, CLT, брус	Минплита + 2 листа ГКЛ	K0(45)



Рис. 9. Фрагмент конструкции стены с нанесенной огнезащитной краской перед испытаниями
Fig. 9. Fragment of a wall structure with applied fire-retardant paint before testing



Рис. 10. Фрагмент конструкции стены с нанесенной огнезащитной краской во время испытаний
Fig. 10. Fragment of a wall structure with applied fire-retardant paint during testing



Рис. 11. Фрагмент конструкции стены с нанесенной огнезащитной краской после испытаний
Fig. 11. Fragment of a wall structure with applied fire-retardant paint after testing



Рис. 12. Фрагмент конструкции стены с двумя слоями ГКЛ перед испытаниями
Fig. 12. Fragment of a wall structure with two plasterboard sheets before testing



Рис. 13. Фрагмент конструкции стены с двумя слоями ГКЛ во время испытаний
Fig. 13. Fragment of a wall structure with two plasterboard sheets during testing



Рис. 14. Фрагмент конструкции стены с двумя слоями ГКЛ после испытаний
Fig. 14. Fragment of a wall structure with two plasterboard sheets after testing



Рис. 15. Фрагмент конструкции стены с минераловатной плитой и двумя слоями ГКЛ перед испытаниями
Fig. 15. Fragment of a wall structure with a mineral wool slab and two plasterboard sheets before testing



Рис. 16. Фрагмент конструкции стены с минераловатной плитой и двумя слоями ГКЛ во время испытаний
Fig. 16. Fragment of a wall structure with a mineral wool slab and two plasterboard sheets during testing



Рис. 17. Фрагмент конструкции стены с минераловатной плитой и двумя слоями ГКЛ после испытаний
Fig. 17. Fragment of a wall structure with a mineral wool slab and two plasterboard sheets after testing

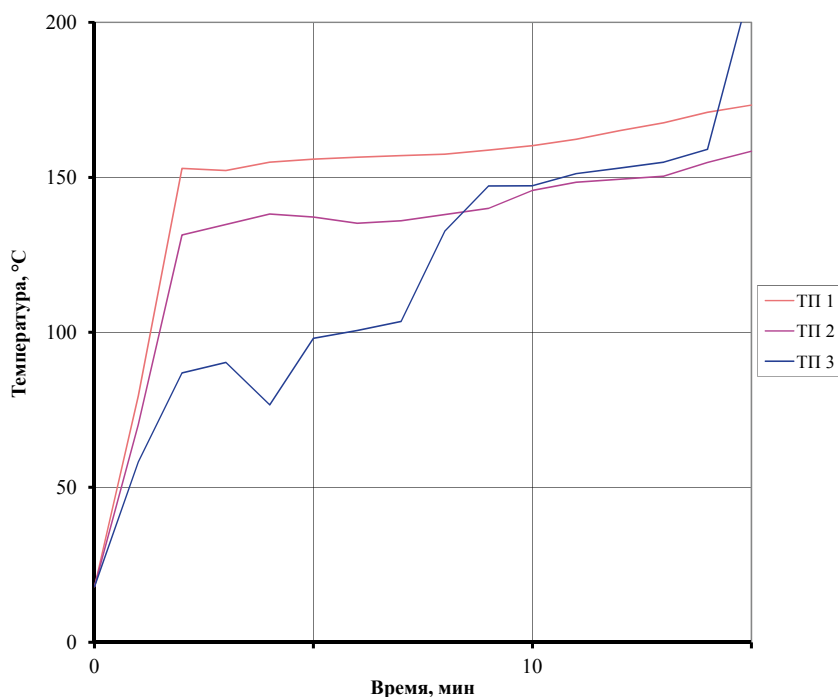


Рис. 18. Зависимости температуры [°C] на поверхности образца под огнезащитной краской от времени (мин) испытания (ТП-1, ТП-2)

Fig. 18. Surface temperature [°C] of TP-1 and TP-2 samples under fire-retardant paint vs time of testing (min)

В результате исследований установлено, что максимальная температура на поверхности образца под огнезащитной краской через 15 мин составила приблизительно 170 °C.

При исследовании фрагментов конструкций с двумя слоями ГКЛ на класс пожарной опасности были получены профили динамики прогрева поверхности образца под ГКЛ (рис. 19).

В результате исследований установлено, что максимальная температура на поверхности образца под двумя листами ГКЛ через 30 мин составила приблизительно 120 °C.

При исследовании фрагментов конструкций стен с минплитой и двумя слоями ГКЛ на класс пожарной опасности были получены профили динамики прогрева поверхности образца под минплитой и ГКЛ (рис. 20).

В результате исследований установлено, что максимальная температура на поверхности образца под минераловатной плитой 50 мм и двумя слоями ГКЛ через 45 мин составила приблизительно 90 °C.

Также дополнительно были получены экспериментальные данные по прогреву поверхности образца под минераловатной плитой и двумя слоями ГКЛ при времени испытания до 100 мин. Результаты представлены на рис. 21.

В результате исследований установлено, что максимальная температура на поверхности образца под минераловатной плитой 50 мм и двумя слоями ГКЛ через 100 мин составила приблизительно 230 °C.

Располагая данными экспериментальных исследований, проведены расчетно-аналитические обоснования пределов огнестойкости исследуемых конструкций с облицовками и средствами огнезащиты.

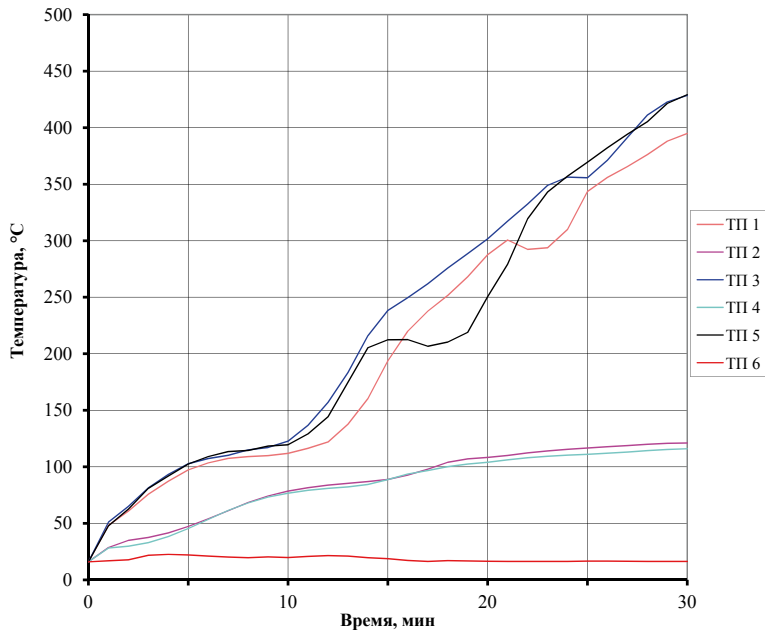


Рис. 19. Зависимости температуры (°C) на поверхности образца под двумя листами ГКЛ от времени (мин) испытания (ТП-2 и ТП-4)

Fig. 19. Surface temperature (°C) of TP-2 and TP-4 samples under two plasterboard sheets vs time of testing (min)

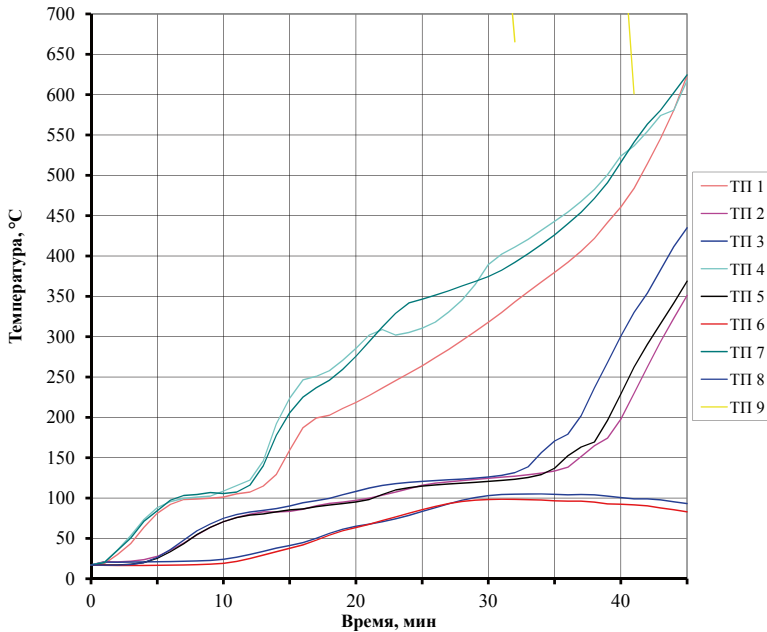


Рис. 20. Зависимости температуры (°C) на поверхности образца под минплитой и двумя слоями ГКЛ от времени (мин) испытания (ТП-6 и ТП-8)

Fig. 20. Surface temperature (°C) of TP-6 and TP-8 samples under a mineral wool slab and two plasterboard sheets vs time of testing (min)

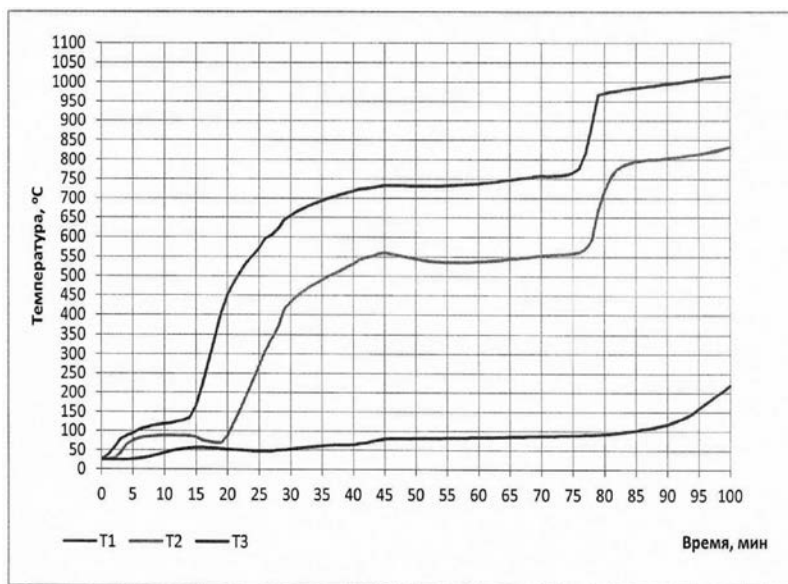


Рис. 21. Динамика прогрева поверхности образца под минплитой и двумя слоями ГКЛ
Fig. 21. Surface heating dynamics of the sample under a mineral wool slab and two plasterboard sheets

На основании данных, полученных при прогреве поверхности конструкций под огнезащитной краской при испытаниях на пожарную опасность, установлено, что через 15 мин температура составила 170 °C, но при этом пенококсовый слой уже начал осыпаться. Предел огнестойкости незащищенного узла при испытаниях составил 15 мин, а расчетный собственный предел огнестойкости незащищенной балки в зависимости от толщины – не менее 70 мин. Поэтому можно утверждать, что предел огнестойкости узла крепления «балка – балка» и «балка – колонна», выполненных из LVL и бруса с огнезащитной краской, будет не ниже R30 по защищенному металлическому узловому соединению.

При испытании на огнестойкость незащищенного фрагмента конструкции стены с металлическим узлом крепления и примыкания к колонне, а также между панелями размером 3000 × 3000 мм и толщиной 200 мм получен предел REI 90, а из испытаний на класс пожарной опасности получены данные, что огнезащитная краска защищает от обугливания конструкцию на 15 мин. То есть суммарный предел огнестойкости равен 105 мин, но такой предел не нормируется в [1], поэтому он остается не ниже REI 90.

На основании данных, полученных при прогреве поверхности конструкций под двумя листами ГКЛ при испытаниях на пожарную опасность, установлено, что через 30 мин температура составила 120 °C. Предел огнестойкости незащищенного узла при испытаниях составил 15 мин, а расчетный собственный предел огнестойкости незащищенной балки – не менее 70 мин. На основании этого можно утверждать, что предел огнестойкости конструкции узла крепления «балка – балка» и «балка – колонна», выполненных из LVL и бруса, с двумя листами ГКЛ будет не ниже R60 по узловому соединению.

При испытании на огнестойкость незащищенного фрагмента конструкции стены с металлическим узлом крепления и примыкания к колонне, а также между панелями размером 3000 × 3000 мм и толщиной 200 мм получен предел REI 90, а из испытаний на класс пожарной

опасности получены данные, что два листа ГКЛ защищают от обугливания конструкцию на 30 мин. На основании этого можно утверждать, что нормируемый предел огнестойкости фрагмента конструкции стены из CLT с двумя листами ГКЛ будет не ниже REI 120.

На основании данных, полученных при прогреве поверхности конструкции под минплитой и двумя листами ГКЛ при испытаниях, установлено, что через 100 мин температура составила 230 °С. Предел огнестойкости незащищенного узла при испытаниях составил 15 мин, а расчетный собственный предел огнестойкости незащищенной балки – не менее 70 мин. На основании этого можно утверждать, что предел огнестойкости конструкции узла крепления «балка – балка» и «балка – колонна», выполненных из LVL и бруса, с минплитой и двумя листами ГКЛ будет не ниже R120.

При испытании на огнестойкость незащищенного фрагмента конструкции стены с металлическим узлом крепления и примыкания к колонне, а также между панелями размером 3000 × 3000 мм и толщиной 200 мм получен предел REI 90. На основании данных, полученных при прогреве поверхности конструкции под минплитой и двумя листами ГКЛ при испытаниях, установлено, что через 100 мин температура составила 230 °С. На основании этого можно утверждать, что нормируемый предел огнестойкости фрагмента конструкции стены из CLT с минплитой и двумя листами ГКЛ будет не ниже REI 150.

Результаты расчетно-аналитических исследований пределов огнестойкости рассматриваемых конструкций представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты расчетно-аналитических исследований пределов огнестойкости

Table 2

Results of calculation and analytical studies of fire resistance limits

№	Образец	Наименование материала	Средство огнезащиты	Результат
1	Узел крепления главной балки и второстепенной балки	LVL, брус	Огнезащитная краска	R30
2	Узел крепления балки и колонны	LVL, брус	Огнезащитная краска	R30
3	Фрагмент конструкции стены с металлическим узлом крепления и примыкания к колонне, а также между панелями	CLT	Огнезащитная краска	REI 90
4	Узел крепления главной балки и второстепенной балки	LVL, брус	2 листа ГКЛ	R60
5	Узел крепления балки и колонны	LVL, брус	2 листа ГКЛ	R60
6	Фрагмент конструкции стены с металлическим узлом крепления и примыкания к колонне	CLT	2 листа ГКЛ	REI 120
7	Узел крепления главной балки и второстепенной балки	LVL, брус	Минплита + 2 листа ГКЛ	R120
8	Узел крепления балки и колонны	LVL, брус	Минплита + 2 листа ГКЛ	R120
9	Фрагмент конструкции стены с металлическим узлом крепления и примыкания к колонне	CLT	Минплита + 2 листа ГКЛ	REI 150

Заключение по результатам исследования

Применение описанных в работе технических решений по огнезащите позволяет обеспечивать требования к зданиям I степени огнестойкости и класса конструктивной пожарной опасности С0 в части обеспечения нормируемых пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций и узловых соединений. Для оптимизации расходов на огнезащиту деревянных строительных конструкций рекомендуется использовать все рассмотренные в работе огнезащитные покрытия: лакокрасочное [5], облегченное конструктивное [6], конструктивное [6]. Выбор технического решения следует принимать исходя из требуемых пределов огнестойкости и классов пожарной опасности строительных конструкций.

При строительстве зданий высотой до 28 м необходимо использование технических решений по применению конструктивного огнезащитного покрытия из негорючих минеральных плит толщиной 50 мм и зашивки двумя листами ГКЛ общей толщиной 25 мм для конструкций из бруса, LVL, CLT или иных решений, подтвержденных в соответствии с положениями [1] и обеспечивающих пределы огнестойкости не менее R90 и классы пожарной опасности K0(45).

Применение облицовок и средств огнезащиты повышает пределы огнестойкости вертикальных и горизонтальных стержневых конструкций:

- до R30 и K0(15) – при применении огнезащитной краски по ГОСТ Р 59274-2020 [5] с расходом 800 г/м^2 – конструкций ферм, балок, прогонов и опорных колонн бесчердачных покрытий [1, табл. 21, 22];

- до R120 и K0(45) – при применении усиленной конструктивной облицовки из ГКЛ по ГОСТ 6266-97 [6] (2 листа по 12,5 мм) и негорючих минераловатных плит (толщина 50 мм) – несущих конструкций зданий: ферм, балок, и колонн [1, табл. 21, 22].

Выводы

Результаты, полученные в работе, предполагается использовать при разработке и совершенствовании нормативных документов в области пожарной безопасности, в развитии дорожной карты деревянного домостроения при разработке нормативных документов, в частности при подготовке изменений в СП 64.13330.2017 [2], п. 10 «Пожарно-технические требования к конструкциям из древесины».

Предлагается внести изменения в СП 64.13330.2017 [2] и дополнить пункт 10.9 следующими абзацами:

«Для конструкций ферм, балок, прогонов и опорных колонн бесчердачных покрытий пределы огнестойкости повышаются до R30 и K0(15), при применении огнезащитной краски по ГОСТ Р 59274 с расходом 800 г/м^2 ;

Для несущих конструкций зданий: ферм, балок, и колонн пределы огнестойкости повышаются до R120 и K0(45), при применении конструктивной облицовки из гипсокартонных листов по ГОСТ 6266 (2 листа толщиной по 12,5 мм) и негорючих минераловатных плит (толщина 50 мм)».

Список литературы

1. Федеральный закон от 22 июля 2008 г. № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219>
2. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции». Актуализированная редакция СНиП II-25-80 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456082589>
3. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. Москва: ИПК Издательство стандартов; 1995.
4. ГОСТ 30403-2012. Конструкции строительные. Метод испытаний на пожарную опасность. Москва: Стандартинформ; 2014.
5. ГОСТ Р 59274-2020. Огнезащитный состав (покрытие) по древесине на основе композиции из полимерных эмульсий. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2021.
6. ГОСТ 6266-97. Листы гипсокартонные. Технические условия. Москва: Госстрой России; 1999.

References

1. Federal Law of July 22, 2008 No. 123-FZ "Technical Regulations on Fire Safety Requirements" [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219>. (In Russian).
2. SP 64.13330.2017. Timber structures. Updated version of SNiP II-25-80 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456082589>. (In Russian).
3. State Standard 30247.1-94. Elements of building construction. Fire resistance test methods. Loadbearing and separating constructions. Moscow: Publishing House of Standards; 1995. (In Russian).
4. State Standard 30403-2012. Building structures. Fire hazard test method. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
5. State Standard R 59274-2020. Fire resistant coating for wood based on polymer-emulsion composition. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. (In Russian).
6. State Standard 6266-97. Gypsum plasterboards. Specifications. Moscow: Gosstroy of Russia; 1999. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Мария Александровна Комарова, канд. хим. наук, руководитель научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Maria A. Komarova, Cand. Sci. (Chem.), Bureau Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Илья Александрович Гришин, заместитель руководителя научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
Il'ya A. Grishin, Deputy Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Никита Олегович Мельников✉, канд. техн. наук, доцент, заведующий лабораторией научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; доцент, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва
e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Nikita O. Melnikov✉, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named

after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Mendelev University of Chemical Technology, Moscow
e-mail: no.melnikov@yandex.ru

Михаил Валерьевич Шалабин, аспирант, заведующий лабораторией научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

Mikhail V. Shalabin, Graduate Student, Laboratory Head, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

Игорь Андреевич Власкин, студент 4-го курса кафедры техносферной безопасности, РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва

Igor A. Vlaskin, 4th Year Student, Technosphere Safety Department, Mendelev University of Chemical Technology, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ОГНЕСТОЙКОСТЬ КЛАДКИ ИЗ КРУПНОФОРМАТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КАМНЕЙ

О.И. ПОНОМАРЕВ^{1,✉}, канд. техн. наук
М.А. МУХИН¹
О.С. ЧИГРИНА¹
М.И. КЛЕЙМЕНОВ²
А.Э. ХУДАЙНАТОВ³

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

² ИЦ «Огнестойкость», Рязанский пр., д. 61, к. 4, г. Москва, 109428, Российская Федерация

³ ООО «ТД БРАЕР», Нагорная ул., д. 18, к. 4, г. Москва, 117186, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Проведенные огневые испытания натуральных фрагментов кладки стен из крупноформатных керамических камней показали, что конструкции стен имеют различный предел огнестойкости, который зависит от вида кладочного раствора, конструкции камня (размеры и расположение внутренних перегородок), толщины стен и ряда других факторов. Это необходимо учитывать при проектировании несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений.

Цель. Определение предела огнестойкости для кладки стен из крупноформатных керамических камней пустотностью до 57 % и подготовка предложений для повышения пределов их огнестойкости для обеспечения надежности сооружений.

Материалы и методы. Испытания проводились до наступления предельного состояния по потере целостности, по потере теплоизолирующей способности, по потере несущей способности в соответствии с ГОСТ 30247.1-94 «Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции».

Результаты. Кладка имеет различный предел огнестойкости в зависимости от толщины стен, вида применяемого кладочного раствора и пустотности кладочных стеновых изделий.

Выводы. По результатам исследований даны рекомендации о необходимости проверки огнестойкости кладки стен из крупноформатных керамических камней пустотностью до 57 % и разработки мероприятий по обеспечению огнестойкости стен в случае применения кладки на клеевых растворах, а также при проектировании стен толщиной менее 250 мм на кладочных растворах всех видов. Рекомендуется включить в свод правил по проектированию ограждающих конструкций из крупноформатных керамических камней специальный раздел, определяющий требования по огнестойкости кладки.

Ключевые слова: крупноформатный керамический камень, пожаробезопасность, предел и критерии огнестойкости, каменная кладка, пустотность, огневое испытание

Для цитирования: Пономарев О.И., Мухин М.А., Чигрина О.С., Клейменов М.И., Худайнатов А.Э. Огнестойкость кладки из крупноформатных керамических камней. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):61–74. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-61-74](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-61-74)

Вклад авторов

Пономарев О.И., Худайнатов А.Э. – введение, анализ результатов исследований, выводы.
Мухин М.А., Чигрина О.С., Клейменов М.И. – проведение экспериментальных исследований.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 08.07.2024

Поступила после рецензирования 15.09.2024

Принята к публикации 17.10.2024

FIRE RESISTANCE OF LARGE-BLOCK CERAMIC MASONRY

O.I. PONOMAREV^{1,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

M.A. MUKHIN¹

O.S. CHIGRINA¹

M.I. KLEIMENOV²

A.E. KHUDAINATOV³

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

² Fire Resistance Test Center, Ryazansky pr., 61, bld. 4, Moscow, 109428, Russian Federation

³ TH BRAER LLC, Nagornaya str., 18, bld. 4, Moscow, 117186, Russian Federation

Abstract

Introduction. The performed fire tests of wall masonry fragments made of large ceramic blocks show that wall structures have different fire resistance limits depending on the type of mortar, block size and location of internal partitions, wall thickness, and a number of other factors. This must be taken into account in the design of load-bearing and enclosing structures of buildings and civil engineering facilities.

Aim. To determine the fire resistance limit for masonry walls made of large ceramic blocks with a void factor of up to 57 % and prepare proposals for increasing their fire resistance limits.

Materials and methods. The tests were carried out until the limit state for the loss of integrity, thermal insulation capacity, and bearing capacity in accordance with State Standard 30247.1-94 "Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. Loadbearing and separating constructions".

Results. The masonry has different fire resistance limits depending on the wall thickness, type of used mortar, and void factor of masonry wall products.

Conclusions. We provide recommendations on the need to check the fire resistance of masonry walls made of large ceramic blocks with a void factor of up to 57 %. In addition, measures should be developed to ensure fire resistance of adhesive mortar masonry walls, as well as walls of any masonry mortar type with a thickness less than 250 mm. We recommend to include a special section defining the requirements for the fire resistance of masonry in the set of rules for the design of enclosing structures made of large ceramic blocks.

Keywords: large ceramic blocks, fire safety, fire resistance limit and criteria, masonry, void factor, fire test

For citation: Ponomarev O.I., Mukhin M.A., Chigrina O.S., Kleimenov M.I., Khudainatov A.E. Fire resistance of large-block ceramic masonry. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):61–74. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-61-74](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-61-74)

Authors contribution statement

Ponomarev O.I., Khudainatov A.E. – introduction, analysis of research results, conclusion.
Mukhin M.A., Chigrina O.S., Kleimenov M.I. – conducting experimental studies.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 08.07.2024

Revised 15.09.2024

Accepted 17.10.2024

Введение

В последние годы в практике строительства находят все большее применение эффективные керамические кладочные изделия, в том числе крупноформатные пустотно-поризованные камни, которые являются современным строительным материалом и применяются при устройстве наружных и внутренних, несущих и ненесущих ограждающих конструкций и перегородок.

Крупноформатные керамические камни имеют большое применение при возведении жилых и гражданских зданий, что связано с целым рядом преимуществ данного материала над традиционными кладочными изделиями. Основными преимуществами кладки из крупноформатных керамических камней являются небольшой объемный вес, низкая теплопроводность, достигаемые благодаря наличию в материале пустот, которые снижают вес изделий и, соответственно, трудоемкость производства работ за счет увеличения размеров камня. Пустотность крупноформатных керамических камней, широко используемых в практике строительства, составляет 55–57%, что обеспечивает повышенные теплотехнические характеристики кладки наружных стен и позволяет в ряде регионов возводить стены зданий с кирпичной облицовкой даже без применения эффективного утеплителя.

Крупноформатный пустотно-поризованный керамический камень – это современный эффективный строительный материал. Крупноформатные камни выпускаются различных типоразмеров. Наибольшее применение этот кладочный материал нашел при устройстве наружных ограждающих несущих и ненесущих стен зданий благодаря высоким теплотехническим характеристикам.

Кладку из крупноформатных керамических камней можно вести как на традиционных цементно-песчаных растворах, так и на теплых и клеевых растворах или клеях. При выполнении кладки на клеевых составах необходима шлифовка опорных граней камня – пастелей. Вертикальные швы имеют пазогребневое соединение и заполняются раствором. Пазогребневые соединения обеспечивают снижение продуваемости вертикального стыка.

Гребень или паз выполняются на тычке, что характерно для камней, предназначенных для устройства трехслойных наружных стен или перегородок. Для камней, предназначенных только для устройства наружных стен, выполняемых преимущественно двухслойными, характерно расположение пазогребневой структуры на ложковой или торцевой поверхностях. Соединение вертикальных швов не заполняется раствором.

Во многих регионах России были введены в эксплуатацию технологические линии по выпуску крупноформатных пустотно-поризованных керамических камней. Вслед за заводом «Победа» в Санкт-Петербурге такие изделия стали выпускать в Киржаче (Владимирская область), Славинске, Калининграде, Верхне-Волжском, Перми и в других городах РФ.

Основная цель статьи – оценка предела огнестойкости для кладки стен из крупноформатных керамических камней пустотностью до 57 % и подготовка предложений для повышения пределов их огнестойкости для обеспечения надежности.

В связи с тем, что керамика и изделия из нее являются негорючим материалом, исследованиям огнестойкости конструкции из крупноформатных камней не уделялось должного внимания. Однако высокая пустотность изделия, тонкие внутренние перегородки камней (5–7 мм) создают условия для значительных деформаций камня и разрушений конструкций.

В целях уточнения пределов огнестойкости кладки из крупноформатных керамических камней пустотностью до 57 % в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко по заказу ООО «ТД Браер» проведены исследования, анализ результатов испытаний огнестойкости кладки из указанных камней, а также разработаны рекомендации по повышению огнестойкости.

Краткое описание экспериментальных образцов

Анализ огнестойкости кладки из крупноформатных керамических камней проведен на 10 образцах. Огневые испытания выполнялись в ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость» и в ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ «ВНИИПО».

Образец № 1 кладки несущей стены толщиной 400 мм (со штукатуркой), выполненной из керамических крупноформатных камней производства ОАО «СтройПанельКомплект» на двухкомпонентном полиуретановом клеевом составе «ISA-PUR 2607 (2К-PUR-K)», под нагрузкой в 21,5 т/п.м. Предел огнестойкости образцов составил 112 мин по потере несущей способности R . Протокол № 12061 от 19.11.2013 г. испытательной лаборатории Научно-исследовательского центра пожарной безопасности ФГБУ «ВНИИПО» МЧС России (ИЛ НИЦ ПБ ФГБУ «ВНИИПО»). Образец разрушился на 112-й минуте.

Образец № 2 кладки несущей стены толщиной 380 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней производства ОАО «СтройПанельКомплект» на двухкомпонентном полиуретановом клеевом составе «ISA-PUR 2607 (2К-PUR-K)», под нагрузкой в 34,5 т/п.м. Предел огнестойкости образца составил 76 мин по потере несущей способности R и целостности E . Протокол № 5 ск/и-2013 от 12.04.2013 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»). Образец разрушился на 76-й минуте.

Образец № 3 кладки несущей стены толщиной 260 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней производства ОАО «СтройПанельКомплект» на двухкомпонентном полиуретановом клеевом составе «ISA-PUR 2607 (2К-PUR-K)», под нагрузкой в 15,0 т/п.м. Предел огнестойкости образца составил 62 мин по потере несущей способности R и целостности E . Протокол № 4 ск/и-2013 от 12.04.2013 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»). Образец разрушился на 62-й минуте.

Образец № 4 кладки несущей стены толщиной 250 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней Porotherm 25 производства ООО «Винербергер Кирпич» на цементно-песчаном растворе, под нагрузкой в 10,0 т/п.м. Предел огнестойкости образца

составил не менее REI240. Протокол № 21 с/ск-2012 от 20.05.2012 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»).

Образец № 5 кладки несущей стены толщиной 120 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней Porotherm 12 производства ООО «Винербергер Кирпич» на цементно-песчаном растворе. Предел огнестойкости образца составил 92 мин по потере теплоизолирующей способности *I*. Протокол № 22 с/ск-2012 от 20.05.2012 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»).

Образец разрушился на 92-й минуте из-за потери целостности образца.

Образец № 6 кладки несущей стены толщиной 250 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней марки «Термоблок» производства ОАО «Биотех» на цементно-песчаном растворе, под нагрузкой в 10,0 т/п.м. Предел огнестойкости образца составил не менее REI240. Протокол № 61 сд/ск-2014 от 06.11.2014 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»).

Образец не разрушился.

Образец № 7 трехслойной кладки несущей стены толщиной 520 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней Porotherm 38 на цементно-песчаном растворе с кирпичной облицовкой и утеплителем из минваты, под нагрузкой в 10,0 т/п.м. Предел огнестойкости образца составил более REI240. Протокол № 25 ск/и-2015 от 17.08.2015 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»).

Образец не разрушился.

Образец № 8 кладки несущей стены толщиной 380 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней производства ООО «ТД БРАЕР» на тонкошовной кладочной смеси, под нагрузкой в 10,0 т/п.м. Предел огнестойкости образца составил REI175. Протокол № 20 ск/и-2023 от 15.03.2023 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»).

Образец не разрушился.

Образец № 9 кладки несущей стены толщиной 380 мм, выполненной из керамических крупноформатных камней производства ООО «Винербергер Кирпич» на тонкошовной кладочной смеси, под нагрузкой в 31,25 т/п.м. Предел огнестойкости образца составил REI150. Протокол № 02 ск/и-2024 от 18.01.2024 г. испытательного центра «Огнестойкость» (ЗАО «ЦСИ «Огнестойкость»).

Образец не разрушился.

Образец № 10 кладки несущей стены толщиной 380 мм был выполнен из крупноформатных керамических камней производства ООО «Винербергер Кирпич» на тонкошовной кладочной смеси, под нагрузкой в 31,25 т/м стены. Предел огнестойкости составил REI150. Протокол № 02 ск/и-2024 от 18.01.2024 г. испытательного центра «Огнестойкость».

Схема расстановки термопар на образце показана на рис. 1. Схема нагружения образца статической нагрузкой перед огневыми испытаниями показана на рис. 2.

При проведении экспериментальных испытаний нагрузка не превышала 15–20 % от разрушающей нагрузки на кладку.

Всего было испытано 10 образцов несущих и ненесущих стен.

На рис. 3 представлен общий вид образца кладки с расставленными термопарами. На рис. 4 представлен керамический камень марки Porotherm 38 Thermo производства ООО «Винербергер Кирпич».

Кривые изменения температуры в печи и на необогреваемой поверхности, а также вертикальные деформации опытных образцов показаны на рис. 5–7. Разрушение панели из крупноформатных керамических камней на тонкошовном растворе (образец № 10) показано на рис. 8.

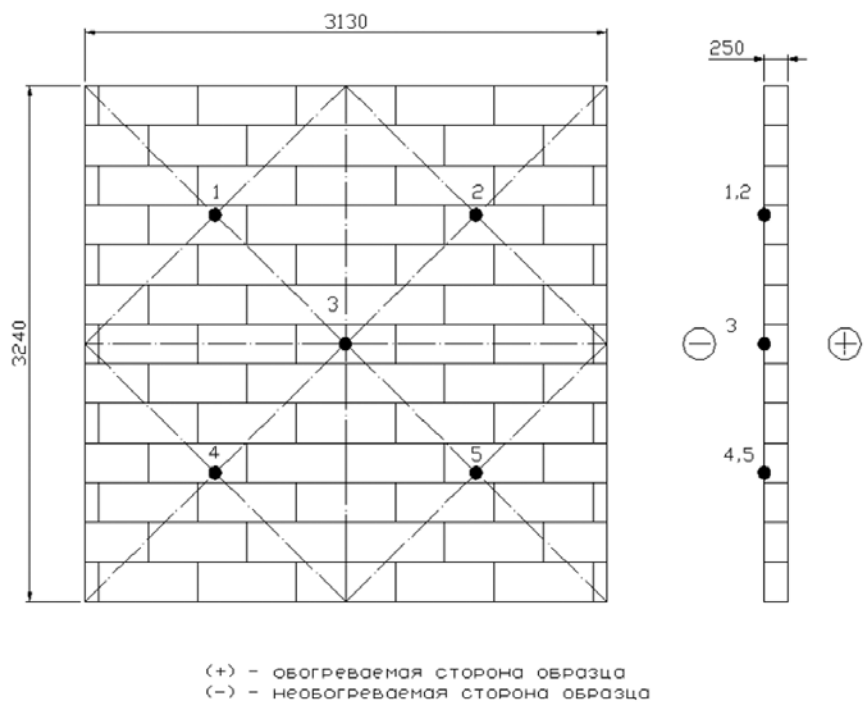


Рис. 1. Схема расстановки термопар на образце
Fig. 1. Scheme of thermocouple location on the sample

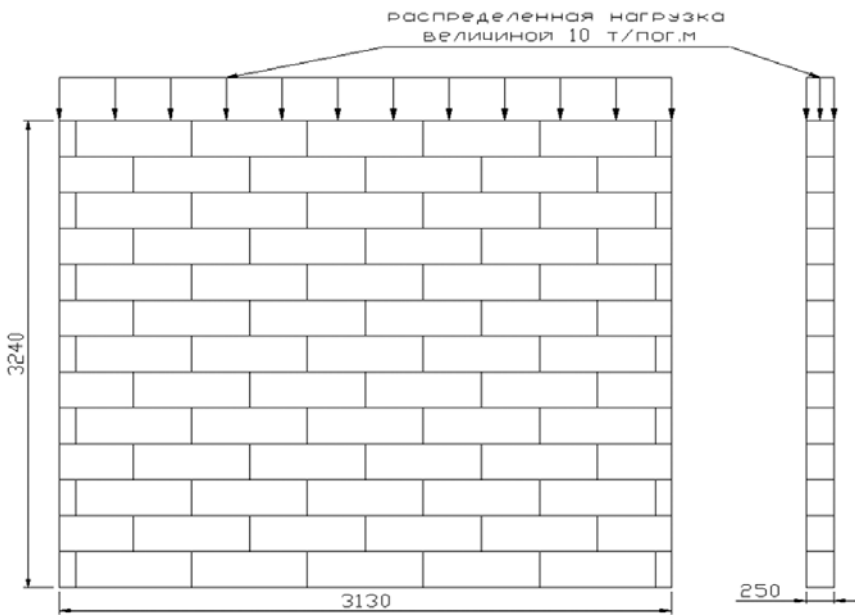


Рис. 2. Схема нагружения образца
Fig. 2. Sample loading scheme



Рис. 3. Общий вид конструкции образца кладки из крупноформатных керамических камней перед испытанием
Fig. 3. General view of a masonry sample made of large ceramic blocks before testing



Рис. 4. Камень керамический поризованный пазогребневый марки Porotherm 38 Thermo
Fig. 4. Porotherm 38 Thermo porous groove ceramic block

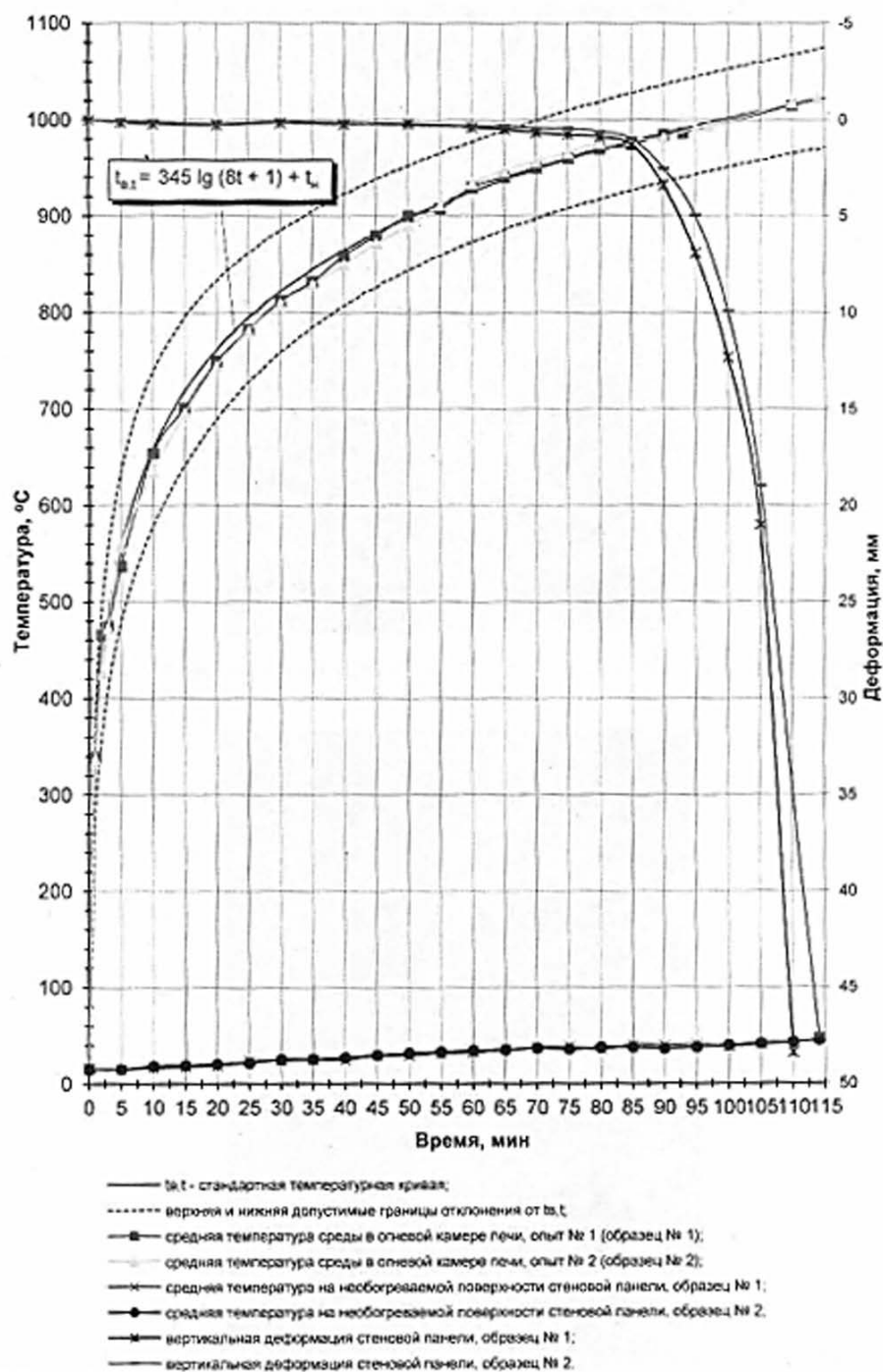


Рис. 5. Кривые изменения температуры и вертикальных деформаций опытного образца № 1
 Fig. 5. Temperature and vertical deformation curves of experimental sample No. 1

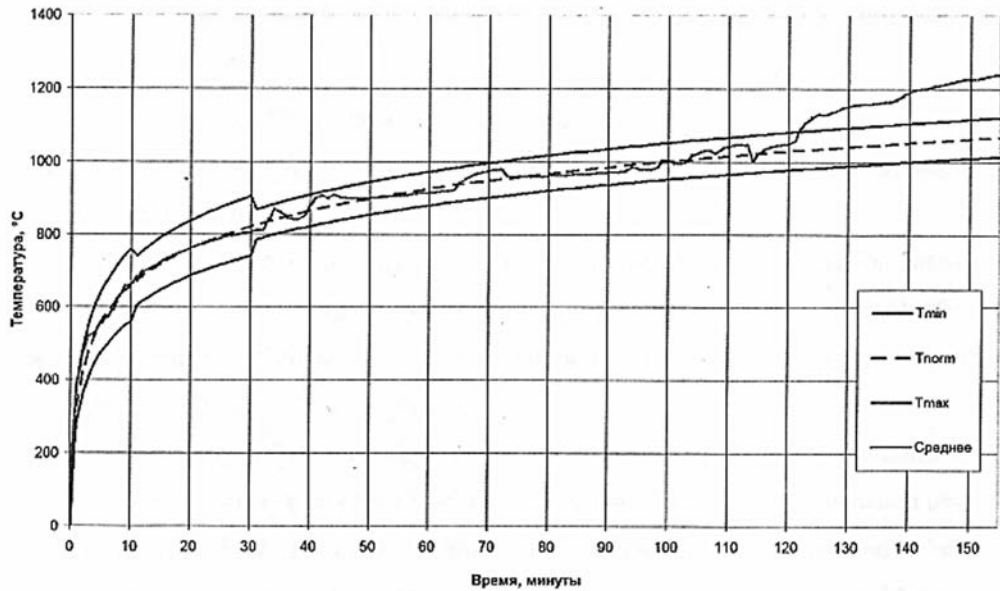


Рис. 6. Изменение температуры в печи при испытании образца № 1
Fig. 6. Temperature change in the furnace during testing sample No. 1

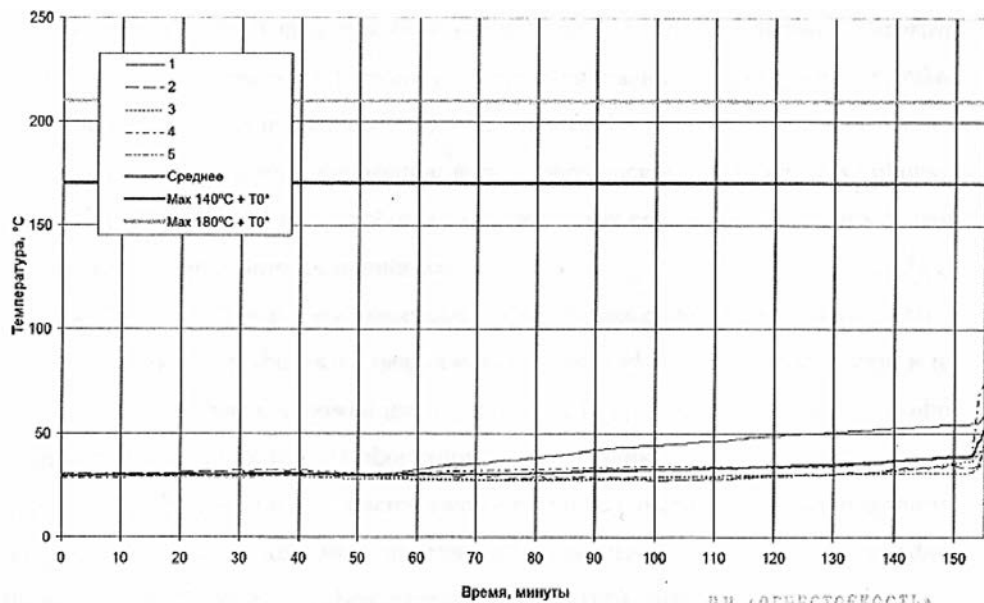


Рис. 7. Изменение температуры на необогреваемой поверхности образца № 10 при проведении испытания
Fig. 7. Temperature change on the unheated surface of sample No. 10 during testing



Рис. 8. Разрушение образца кладки из крупноформатных керамических камней
Fig. 8. Destruction of a masonry sample made of large ceramic blocks

Проведенные исследования и анализ выполненных работ показали, что низкий предел огнестойкости имеет тонкошовная кладка и кладка на двухкомпонентных полиуретановых клеях. Причиной снижения предела огнестойкости является фактор конвекции теплового потока по высоте, так как клеи и растворы для тонкошовной кладки не перекрывают пустоты камня.

Заключение

По результатам проведенных экспериментальных исследований, а также на основании анализа работ, выполненных российскими и зарубежными специалистами, могут быть сделаны следующие выводы и рекомендации по повышению огнестойкости кладки из крупноформатных керамических камней пустотностью до 57%.

1. Крупноформатные керамические камни относятся к негорючим материалам (НГ).
2. Несущие конструкции кладки из крупноформатных керамических камней должны быть запроектированы и возведены таким образом, чтобы они сохраняли несущую способность в течение соответствующей продолжительности воздействия пожара.

3. Ограждающие конструкции из кладки пожарных секций (отсеков), включая стыки, должны быть запроектированы и изготовлены таким образом, чтобы они сохраняли свою ограждающую способность в течение соответствующей продолжительности воздействия пожара, т. е.:

- температура на необогреваемой стороне не должна превышать заданных пределов;
- конструкции должны противостоять механическому удару в соответствии с проектными требованиями;
- тепловое излучение с необогреваемой стороны должно быть ограничено в соответствии с проектными требованиями.

4. Несущие и ограждающие конструкции следует рассчитывать с учетом их деформативности при повышенных температурах и применять соответствующие мероприятия.

5. Класс пожарной опасности конструкций из крупноформатных керамических камней по критериям оценки ГОСТ 30403-2012 [1] соответствует К0.

6. Предел огнестойкости кладки из крупноформатных керамических камней зависит от следующих факторов:

- типа кладочных изделий – формы пустот (прямоугольные, ромбовидные и т. п.), процента пустотности, толщины наружных внутренних стенок камня;
- типа применяемых растворов – растворы общего назначения (сложные), растворы для тонкослойной кладки, легкие растворы;
- величины нагрузки и несущей способности стены.

7. При проектировании зданий из крупноформатных керамических камней необходимо учитывать следующие факторы:

- при повышении напряжений в кладке из крупноформатных керамических камней ее предел огнестойкости снижается значительно больше, чем в кладке из полнотелых изделий или изделий с небольшой пустотностью;
- предел огнестойкости кладки из крупноформатных керамических камней зависит от толщины стены. При уменьшении толщины стены огнестойкость кладки снижается как по теплоизолирующей способности (I), так и по несущей способности (R);
- при проектировании несущих конструкций с применением кладки из крупноформатных керамических камней на двухкомпонентном полиуретановом клее или тонкошовном растворе необходимо предусмотреть мероприятия по повышению огнестойкости кладки.

Список литературы

1. ГОСТ 30403-2012. Конструкции строительные. Метод испытания на пожарную опасность. Москва: Стандартинформ; 2014.
2. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-30122009-n-384-fz-tekhnicheskii/>.
3. Федеральный закон от 22.07.2008 № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/FZ-Teh-reglament-o-trebovanijah-pozharnoj-bezopasnosti/>.
4. EN 1996-1-2:2005. Eurocode 6. Design of masonry structures. Part 1-2: General rules. Calculation of structures in case of fire [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1996.1.2.2005.pdf>.

5. ГОСТ 530-2012. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2013.
6. ГОСТ 30247.1-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции. Москва: ИПК Издательство стандартов; 1995.
7. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. Москва: ИПК Издательство стандартов; 1996.
8. СТ СЭВ 383-87. Пожарная безопасность в строительстве. Термины и определения. Магдебург. 1987 [интернет]. Режим доступа: <https://ru-bezh.ru/uploads/instrukcii/gost/%D0%A1%D0%A2%20%D0%A1%D0%AD%D0%92%20%20383-87.pdf>.
9. СНиП 21-01-97*. Пожарная безопасность зданий и сооружений (с Изменениями № 1, 2) [интернет]. Режим доступа: [https://www.rgk-group.ru/upload/iblock/692/download%20\(4\).pdf](https://www.rgk-group.ru/upload/iblock/692/download%20(4).pdf).
10. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81*. Москва: Стандартинформ; 2021.
11. ЦНИИСК им. Кучеренко Госстроя СССР. Пособие по определению пределов огнестойкости конструкций, пределов распространения огня по конструкциям и групп возгораемости материалов (к СНиП II-2-80). Москва: Стройиздат; 1985.
12. EN 1996-1-1:2005. Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1996.1.1.2005.pdf>.
13. Ройтман В.М. Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. Москва: Пожнаука; 2001.
14. Зайцев А.М., Грошев М.Д. Огнестойкость и огнезащита строительных конструкций. 2-е изд. Воронеж: Воронежский ГАСУ; 2016.
15. Романенков И.Г., Левитес Ф.А. Огнезащита строительных конструкций. Москва: Стройиздат; 1991.

References

1. State Standard 30403-2012. Building structures. Fire hazard test method. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
2. Federal Law of 30.12.2009 No. 384-FZ "Technical regulations on the safety of buildings and structures" [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-30122009-n-384-fz-tekhnicheskii/>. (In Russian).
3. Federal Law of 22.07.2008 No. 123-FZ "Technical regulations on fire safety requirements" [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/FZ-Teh-reglament-o-trebovaniyah-pozharnoj-bezopasnosti/>. (In Russian).
4. EN 1996-1-2:2005. Eurocode 6. Design of masonry structures. Part 1-2: General rules. Calculation of structures in case of fire [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1996.1.2.2005.pdf>.
5. State Standard 530-2012. Ceramic brick and stone. General specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. (In Russian).
6. State Standard 30247.1-94. Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. Loadbearing and separating constructions. Moscow: Publishing House of Standards; 1995. (In Russian).
7. State Standard 30247.0-94. Elements of building constructions fire-resistance test methods. General requirements. Moscow: Publishing House of Standards; 1994. (In Russian).
8. ST SEV 383-87. Fire safety in construction. Terms and definitions. Magdeburg. 1987 [internet]. Available at: <https://ru-bezh.ru/uploads/instrukcii/gost/%D0%A1%D0%A2%20%D0%A1%D0%AD%D0%92%20%20383-87.pdf>. (In Russian).
9. SNiP 21-01-97*. Fire safety of buildings and works (with Amendments No. 1, 2) [internet]. Available at: [https://www.rgk-group.ru/upload/iblock/692/download%20\(4\).pdf](https://www.rgk-group.ru/upload/iblock/692/download%20(4).pdf). (In Russian).

10. SP 15.13330.2020. Masonry and reinforced masonry structures. Updated version of SNiP II-22-81*. Moscow: Standartinform Publ., 2021. (In Russian).
11. TSNIISK named after Koucherenko of the USSR Gosstroy. Manual for determining fire resistance limits of structures, fire propagation limits for structures and flammability groups of materials (to SNiP II-2-80). Moscow: Stroyizdat Publ.; 1985. (In Russian).
12. EN 1996-1-1:2005. Eurocode 6: Design of masonry structures. Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1996.1.1.2005.pdf>.
13. Roytman V.M. Engineering solutions for assessing the fire resistance of designed and reconstructed buildings. Moscow: Pozhnauka Publ.; 2001. (In Russian).
14. Zaitsev A.M., Groshev M.D. Fire resistance and fire protection of building structures. 2nd ed. Voronezh: Voronezh GASU; 2016. (In Russian).
15. Romanenkov I.G., Levites F.A. Fire protection of building structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1991. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Олег Иванович Пономарев , канд. техн. наук, заведующий лабораторией кирпичных, блочных и панельных зданий (№ 7), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1701088@mail.ru
тел.: +7 (499) 170-10-59

Oleg I. Ponomarev , Cand. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Laboratory of Brick, Block, and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 1701088@mail.ru
tel.: +7 (499) 170-10-59

Михаил Александрович Мухин, заместитель заведующего лабораторией кирпичных, блочных и панельных зданий (№ 7), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: mukhin@myrambler.ru
тел.: +7 (499) 174-77-93

Mikhail A. Mukhin, Deputy Head, Laboratory of Brick, Block, and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: mukhin@myrambler.ru
tel.: +7 (499) 174-77-93

Ольга Сергеевна Чигрина, заведующий сектором лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий (№ 7), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: schigrin@mail.ru
тел.: +7 (903) 172-98-97

Olga S. Chigrina, Sectoral Head, Laboratory of Brick, Block, and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: schigrin@mail.ru
tel.: +7 (903) 172-98-97

Максим Игоревич Клейменов, руководитель, ИЦ «Огнестойкость», Москва
e-mail: maxim@tsniiskfire.com
тел.: +7 (926) 529-20-67

Maxim I. Kleimenov, Director, Fire Resistance Testing Center, Moscow
e-mail: maxim@tsniiskfire.com
tel.: +7 (926) 529-20-67

Алексей Эдуардович Худайнатов, генеральный директор, ООО «ТД БРАЕР», Москва

e-mail: logvinov@braer.ru

тел.: +7 (915) 368-36-60

Alexey E. Khudainatov, General Director, TH BRAER LLC, Moscow

e-mail: logvinov@braer.ru

tel.: +7 (915) 368-36-60

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-75-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-75-83)
УДК 624.04

EDN: LXCJHG

СПОСОБ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ТОНКОСТЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ

А.А. СЕРЫХ

ООО «Хабтранс-ДВ», ул. Гайдара, д. 14, г. Хабаровск, 680000, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Обилие подходов численного моделирования, инженерных решений, включая использование технических программных комплексов, не дало возможности найти рациональный универсальный метод повышения такого значимого параметра, как износостойкость строительных конструкций, что делает актуальными исследования в данной области.

Цель. Проведение испытаний конструктивных элементов с заданными параметрами для оценки возможных вариантов применения искусственно созданных материалов (упругие, низко модульные) с целью демпфирования конструкций, включая их компоненты на примере металлических мостовых балок.

Материалы и методы. В ходе исследования применялись численные методы оценки на основе параметрического анализа консольной балки и балки мостового крана (решение дифференциальных уравнений второго порядка). Частотный анализ балки проводился путем компьютерного моделирования в программной среде SolidWorks. Проводилось сравнение полученных значений показателей логарифмического понижения прочности металлических мостовых конструкций с общепринятыми справочными величинами в определенных диапазонах. В качестве исходных данных в численных расчетах фигурировали такие показатели, как грузоподъемность мостового крана – 20 тонн, пролет – 19,5 метров. Исходные размеры поперечного сечения стальной мостовой балки были выбраны на основе предложенной методики В.Е. Дусье, Ю.В. Наварского, В.П. Жегульского: $H = 1,1$ м; $b = 0,6$ м; $S = 9$ мм.

Результаты. Численное и компьютерное моделирование продемонстрировало возможность увеличения срока службы элементов конструкций технического оборудования, демпфируемых изоляционным материалом. Была определена необходимость тестирования усталостных характеристик наполнителя, его адгезии к металлу. Поиск рационального решения возможен при условии детального изучения схемы размещения изоляционного материала внутри конструкции.

Выводы. С точки зрения задач оптимизации необходимо проводить оценку стоимости проекта. В то же время представленные результаты показали, что такой способ демпфирования имеет хорошие перспективы с точки зрения повышения прочности и долговечности элементов металлических конструкций.

Ключевые слова: конструктивные элементы, прочность, долговечность, эффективность, тонкостенные элементы, низко модульные пенопласты, демпфирующий эффект, частотный анализ, энергетический подход, модель коробчатой балки

Для цитирования: Серых А.А. Способ повышения прочности и долговечности тонкостенных элементов металлических конструкций. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):75–83. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-75-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-75-83)

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 25.11.2024

Поступила после рецензирования 14.01.2025

Принята к публикации 23.01.2025

METHOD FOR INCREASING THE STRENGTH AND DURABILITY OF THIN-WALLED ELEMENTS IN METAL STRUCTURES

A.A. SERYKH

Khabtrans-DV LLC, Gaidar str., 14, Khabarovsk, 680000, Russian Federation

Abstract

Introduction. The abundance of numerical simulation approaches and engineering solutions, including the use of technical software packages, fails to find an appropriate universal method for increasing such a significant parameter as the durability of building structures.

Aim. To conduct tests of structural elements with specified parameters; to assess possible options of artificial elastic and low-modulus materials for damping structures, including their components, by the example of metal bridge beams.

Materials and methods. The study uses numerical assessment methods based on the parametric analysis of the cantilever and overhead crane beams by solving second-order differential equations. The frequency analysis of beams was carried out using computer simulation in the SolidWorks software environment. The obtained values of the logarithmic strength reduction indicators for metal bridge structures were compared with generally accepted reference values in certain ranges. The initial data of the numerical calculations for the bridge crane included the lifting capacity of 20 t and span of 19.5 m. The initial dimensions of the cross-section for the steel bridge beam were selected based on the methodology by V.E. Dus'e, Yu.V. Navarskii, and V.P. Zhegul'skii: $H = 1.1$ m; $b = 0.6$ m; $S = 9$ mm.

Results. Numerical and computer simulation has demonstrated the possibility of increasing the durability of structural elements in technical equipment damped by insulating materials. However, fatigue characteristics of the filler and its adhesion to the metal should be tested. An appropriate solution can be obtained provided the studied in detail layout of the insulating material inside the structure.

Conclusions. For optimization problems, it is necessary to conduct an assessment of the project cost. At the same time, the presented results show that this damping method has good prospects in terms of increasing the strength and durability of metal structural elements.

Keywords: structural elements, strength, durability, efficiency, thin-walled elements, low-modulus foams, damping effect, frequency analysis, energy approach, box beam model

For citation: Serykh A.A. Method for increasing the strength and durability of thin-walled elements in metal structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):75–83. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-75-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-75-83)

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 25.11.2024

Revised 14.01.2025

Accepted 23.01.2025

Проблема увеличения долговечности конструкций (элементов, изделий) остается актуальной для многих отраслей, несмотря на наличие множества различных подходов. Тонкостенные конструктивные элементы подвержены изменениям, что приводит к формированию усталостных трещин на поверхности [1]. Такие преобразования влекут за собой барьеры при реализации на практике, однако за счет уменьшения колебаний конструктивных элементов и изделия в целом увеличивается параметр долговечности, например с помощью различных виброгасителей [2]. В строительной отрасли, авиастроении повышение долговечности конструктивных элементов реализуется за счет использования трехслойных плит и оболочек [3].

Коробчатые балки и стержни с тонкими стенками из замкнутых профилей находят широкое применение в конструкциях технических средств для горнодобывающей промышленности и транспортной сферы (оборудование, машины). Эксплуатация технических средств проходит в режиме воздействия обширного диапазона высоких рутинных и пиковых внезапных динамических нагрузок.

Увеличение долговечности технических средств, в том числе формирование комфортной рабочей среды обслуживающего персонала, напрямую зависит от снижения активности возникающих нагрузок. Реализация защитных функций сотрудников от негативного воздействия (шум, вибрации) достигается путем применения легковесных теплоизоляционных материалов (ППТ), препятствующих разрушению, ржавлению (коррозия). Приоритетной функцией наполнителя является поглощение энергии вибрации, в том числе снижение динамики внешних нагрузок (амплитуда, количество).

Целью статьи является поиск рациональных решений применения искусственно созданных материалов (упругие, низкомодульные) с целью демпфирования конструкций, включая их компоненты на примере металлических мостовых балок. Для реализации прочностного анализа и вычислительного эксперимента был использован программный комплекс SolidWorks.

В целях исследования проводились испытания балок из стали со следующими характеристиками: длина $l = 600$ мм, ширина коробчатого сечения $b = 25$ мм, высота $H = 70$ мм, толщина стенки $S = 1,5$ мм.

Определение таких параметров, как износоустойчивость и прочность компонентов несущих конструкций технического оборудования, напрямую связано с определением ключевого аспекта – с оценкой напряжений при изгибе. В работе будет допущено предположение о наличии только свободных колебаний балок, которые подвергаются изгибу. Поиск рациональных решений предполагает последовательность следующих шагов:

- определение числа циклов свободной вибрации с существенным затуханием;
- параметрический анализ консольной балки;

– параметрический анализ балки мостового крана.

Оценочные расчеты позволяют рассматривать колебания балки как материальную точку с уменьшенной массой m_p на пружине эквивалентной жесткости c_e . Однородные дифференциальные уравнения второго порядка позволяют описать свободные колебания материальной точки [4]. Если пренебречь силами сопротивления, то можно искать решения следующего уравнения:

$$x'' + p^2 \times x = 0 \quad (1)$$

где $p^2 = c_e/m_p$ – квадрат угловой частоты;

c_e – жесткость стальной балки;

m_p – пониженная жесткость балки без наполнителя.

Для точки $T = 1/\omega$ свободные гармонические колебания будут иметь частоту $\omega = p/2\pi$.

Если на систему оказывают влияние силы низкого сопротивления, соразмерные скорости перемещения первой степени $R = \alpha x$, то для изделий из конструктивных элементов будет действовать уравнение:

$$x'' + 2n \times x' + p_1^2 \times x = 0, \quad (2)$$

где $n = \alpha/2m_{pr}$;

α – коэффициент сопротивления, уменьшенная масса балки с изоляционным материалом;

m_{pr} – уменьшенная масса балки с изоляционным материалом;

$p_1^2 = c_{er}/m_{pr}$ – квадрат угловой частоты для балки с изоляционным материалом;

c_{er} – эквивалентная жесткость балки с изоляционным материалом.

Тогда свободные затухающие колебания будут характеризоваться частотой $\omega_1 = p_1/2\pi$, условный период $T_1 = 2\pi/p_1$, в свою очередь угловая частота будет определяться следующим образом: $p_1 = \sqrt{p^2 - n^2}$.

Эмпирическая информация тождественна входным параметрам для оценки констант на основе дифференциальных уравнений. Следующие равенства $x = x_0, x'_0 = 0$ справедливы при $t = 0$.

Получаем выражение для затухающих колебаний балки с постепенно уменьшающейся амплитудой в течение $n < p_1$. Огибающие кривой процесса определяются функциями:

$$x = \pm x_0 \times e^{-nt}. \quad (3)$$

Оценить амплитуду вибрации позволяет простое выражение $x/x_0 \geq 0,1$, независящее от величины исходного смещения x_0 . Выражения (3) и (4) дают возможность рассчитать необходимое время t :

$$t_* = -\frac{\ln 0,1}{n} = -\frac{\ln 0,1}{\sqrt{p^2 - p_1^2}}. \quad (4)$$

Предполагаемое количество весомых циклов N рассчитывается по формуле, в том числе для известных частот p и p_1 :

$$N = \frac{t_*}{T_1} = -\frac{p_1 \ln 0,1}{2\pi \sqrt{p^2 - p_1^2}} = -\frac{\omega_1 \ln 0,1}{2\pi \sqrt{\omega^2 - \omega_1^2}}. \quad (5)$$

Инновационные интеллектуальные системы дают возможность оценить собственные частоты ω , ω_1 для компонентов с тонкими стенками различной конфигурации.

Подбор ширины стенки S и высоты слоя термоизоляционного материала h для металлической балки осуществляем на основе энергетического анализа, обозначая их переменными параметрами.

Используя программную среду SolidWorks, проводим частотный анализ консольной балки в исходном состоянии и с пенопластовым наполнителем [5]. Для проведения частотного анализа были построены твердотельная модель коробчатой балки и сборочная модель, заполненная пенопластом.

Предположим, что ω – это собственная частота балки без наполнителя, а ω_1 – частота балки с наполнителем, и проведем оценку демпфирующего эффекта, который оказывают пенопласты, на основе выражения (6).

Определяем наименьшие частоты колебаний балок в исходном состоянии или с пенопластовым наполнителем для интервала $S \in [0,2; 1,5]$ мм.

На рис. 1 отражена зависимость количества циклов вибрации от толщины стенки балки с наполнителем. При этом число весомых колебаний связано с толщиной стенки конкретным сегментом балки.

Справочные издания содержат информацию о логарифмическом снижении прочности металлических мостовых конструкций в диапазоне $\delta = 0,05-0,12$. При заданном уровне значимости 0,1 число свободных колебаний ограничено диапазоном 19–49 циклов. Результаты численных экспериментов демонстрируют тождественность числа колебаний интервалу 11–33 цикла. Этот показатель ниже величины числа колебаний на 30 % по сравнению

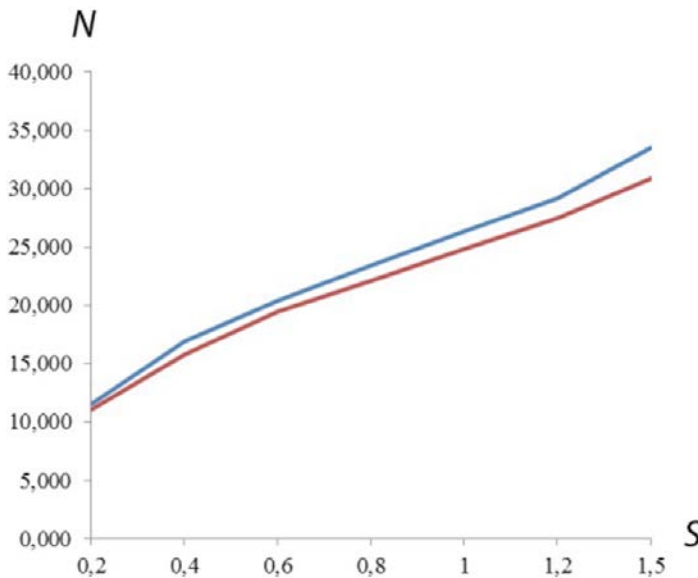


Рис. 1. Графическая интерпретация соотношения количества циклов вибрации N от толщины стенки металлической балки S : синяя линия (верхняя) – горизонтальная плоскость; красная (нижняя) – вертикальная плоскость

Fig. 1. Number of vibration cycles N taken relative to the wall thickness of a metal beam S : blue line (upper) – horizontal plane; red (lower) – vertical plane

с коробчатой балкой. Полученные данные обозначим термином «весомые». Проведенные расчеты о предполагаемом числе циклов для балки, наполненной изоляционным материалом, требуют валидационной проверки.

В качестве исходных данных в численных расчетах фигурировали такие показатели, как грузоподъемность мостового крана – 20 тонн, пролет – 19,5 метров. Исходные размеры поперечного сечения стальной мостовой балки были выбраны на основе предложенной методики [6]: $H = 1,1$ м; $b = 0,6$ м; $S = 9$ мм.

Форма изгибных колебаний для балки зависит от ее крепления при определенных выбранных условиях.

Логарифмическое уменьшение амплитуды колебаний δ связано с коэффициентом демпфирования n , который определяется из выражения (3) как $\delta = T_1 n$. Его значения определены в справочниках. В табл. 1 и 2 приведены значения декремента, рассчитанные для балок моста с различной высотой слоя наполнителя H .

Таблица 1

Логарифмическое уменьшение свободных затухающих колебаний δ в горизонтальной плоскости

Table 1

Logarithmic decrement δ of free damped oscillations in the horizontal plane

Толщина стенки, s , мм	Высота слоя шпатлевки, мм				
	220	440	660	880	1100
4	0,158	0,176	0,190	0,207	0,231
5	0,134	0,152	0,168	0,182	0,207
6	0,116	0,134	0,151	0,168	0,189
7	0,091	0,109	0,128	0,145	0,174
8	0,070	0,094	0,115	0,129	0,160
9	0,053	0,081	0,100	0,113	0,146
10	0,049	0,074	0,094	0,109	0,137

Таблица 2

Логарифмический декремент свободных затухающих колебаний δ в вертикальной плоскости

Table 2

Logarithmic decrement δ of free damped oscillations in the vertical plane

Толщина стенки, s , мм	Высота слоя шпатлевки, мм				
	220	440	660	880	1100
4	0,124	0,173	0,203	0,233	0,251
5	0,099	0,145	0,173	0,197	0,222
6	0,089	0,125	0,152	0,177	0,194
7	0,081	0,127	0,149	0,169	0,184
8	0,076	0,111	0,137	0,153	0,171
9	0,067	0,100	0,122	0,143	0,158
10	0,065	0,098	0,118	0,133	0,152

На рис. 2 показаны графики изменения коэффициента сжатия в зависимости от выбранных параметров. Демпфирующая способность компонентов технического оборудования повышается с уменьшением толщины стенки и увеличением высоты слоя изоляционного материала.

Соответственно снижается число весовых циклов. На рис. 3 демонстрируется взаимосвязь числа циклов, толщины стенки балки и высоты демпфирующего слоя в определенных диапазонах.

Для прошедшей испытания в лабораторных условиях балки (рис. 1) и балки моста (рис. 3) сделан прогноз получения значительного демпфирующего эффекта от использования в качестве наполнителей легких низкомодульных пенопластов. Результаты исследований показали снижение количества колебаний в обеих плоскостях (горизонтальная, вертикальная)

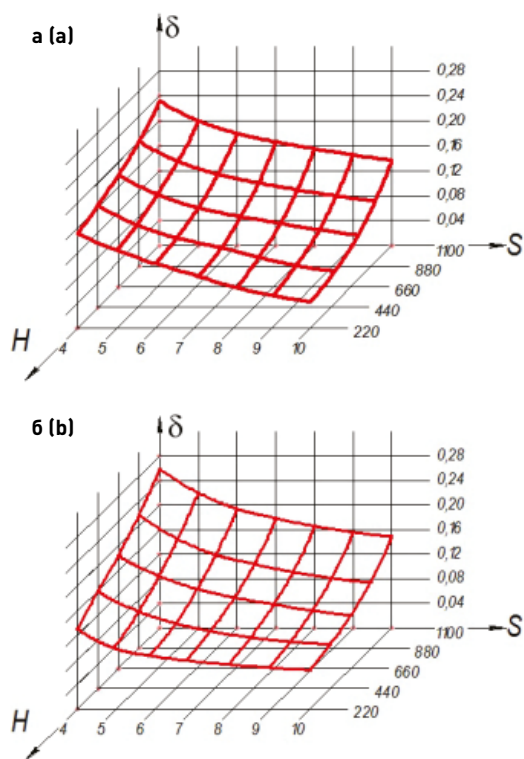


Рис. 2. График изменения коэффициента сжатия в зависимости от толщины стенки и высоты слоя изоляционного материала: а – горизонтальная плоскость; б – вертикальная плоскость

Fig. 2. Change in the compression coefficient depending on the wall thickness and the height of the insulating layer: а – horizontal plane; б – vertical plane

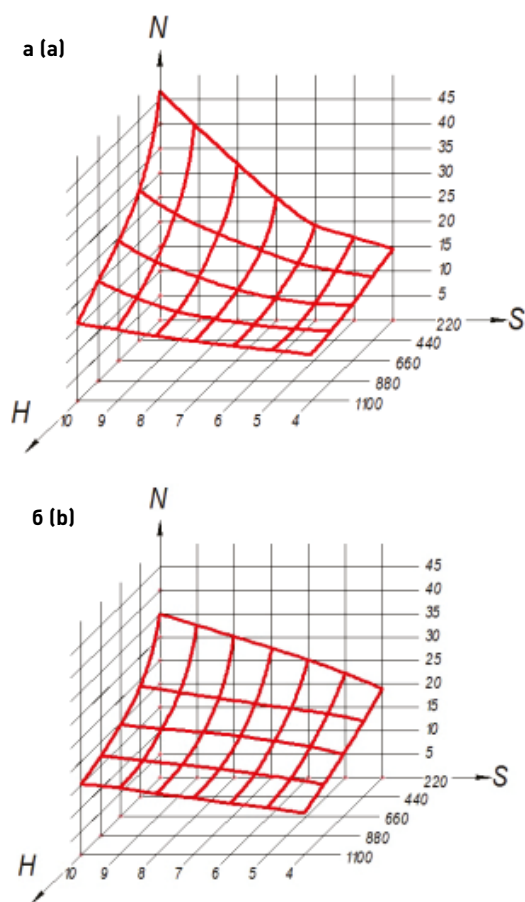


Рис. 3. График зависимости весовых колебаний балки от заданных исходных параметров: а – горизонтальная плоскость; б – вертикальная плоскость

Fig. 3. Dependence of loaded beam vibrations on given initial parameters: а – horizontal plane; б – vertical plane

при повышении значения высоты слоя изолирующего материала. Заданная толщина стенки составляла 9 мм.

Подбор значения поперечного сечения балки не зависит от характеристик изоляционного материала, а базируется на условиях прочности и таком показателе, как жесткость конструкционного элемента. Но, с другой стороны, дает возможность варьировать значением толщины стенки в сторону уменьшения.

Прогнозируемое сокращение числа значительных циклов для металлических конструкций, демпфируемых с помощью низкомодульных пенопластов, может быть использовано как фундамент для детальной проработки эффективного метода повышения долговечности конструкций.

Сегодня это актуально для строительной техники, эксплуатирующейся в разных отраслях в режимах повышенных динамических нагрузок широкого спектра. Исследование конструкций на примере балок из стали под воздействием постоянно колеблющихся импульсных нагрузок позволило бы глубже выразить теоретическое обоснование.

Вычислительные эксперименты выявили лишь принципиальную возможность продления срока службы деталей машин, демпфируемых наполнителем. Необходимо непосредственно в экспериментах проверять усталостные свойства наполнителя, его адгезию к металлу. Рациональное решение может быть найдено при дополнительном изучении схемы размещения наполнителя внутри конструкции.

С точки зрения задач оптимизации необходимо проводить оценку стоимости проекта. В то же время представленные результаты показали, что такой способ демпфирования имеет хорошие перспективы с точки зрения повышения прочности и долговечности элементов металлических конструкций.

Список литературы

1. Щипачев А.М., Мухин В.С. Модель влияния поверхностного пластического деформирования на усталостную долговечность. Известия высших учебных заведений. Авиационная техника. 2002;{1}:76–77.
2. Либман Я.Л., Летнев К.Ю. Автоматическое устранение колебаний груза на гибкой подвеске при подъеме и опускании. Екатеринбург: УрФУ; 2012.
3. Болотин В.В., Новичков Ю.Н. Механика многослойных конструкций. Москва: Машиностроение; 1980.
4. Смирнов В.И. Курс высшей математики. Т. 2. Москва: Наука; 1974.
5. Алямовский А.А., Собачкин А.А., Одинцов Е.В., Харитонович А.И., Пономарев Н.Б. SolidWorks. Компьютерное моделирование в инженерной практике. Санкт-Петербург: БХВ-Петербург; 2005.
6. Дусье В.Е., Наварский Ю.В., Жегульский В.П. Расчет и проектирование металлических конструкций мостового крана. Екатеринбург: УГТУ-УПИ; 2007.

References

1. Shchipachev A.M., Mukhin V.S. Model of the effect of surface plastic deformation on fatigue life. Izv. VUZ. Aviatcionnaya Tekhnika. 2002;{1}:76–77. (In Russian).
2. Liberman Ya.L., Letnev K.Yu. Automated vibration elimination for the load lifted or lowered on a flexible suspension. Ekaterinburg: UrFU; 2012. (In Russian).
3. Bolotin V.V., Novichkov Yu.N. Mechanics of multilayer structures. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1980. (In Russian).

4. *Smirnov V.I.* Course on higher mathematics. Vol. 2. Moscow: Nauka Publ.; 1974. (In Russian).
5. *Alyamovskii A.A., Sobachkin A.A., Odintsova E.V.* Computer-aided design in SolidWorks for engineering purposes. Saint Petersburg: BHV-Petersburg; 2005. (In Russian).
6. *Dus'e V.E., Navarskii Yu.V., Zhegul'skii V.P.* Calculation and design of bridge crane metallic structures. Ekaterinburg: UGTU-UPI; 2007. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Алексей Александрович Серых, директор по строительству, ООО «Хабтранс-ДВ», Хабаровск
e-mail: Kaliberdajob@mail.ru

Aleksei A. Serykh, Director for Construction, Khabtrans-DV LLC, Khabarovsk
e-mail: Kaliberdajob@mail.ru

ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЛАЖНОСТИ В СЛОИСТОЙ СТРУКТУРЕ МАТЕРИАЛОВ КОНСТРУКЦИЙ ОБЪЕКТОВ КУЛЬТУРНОГО НАСЛЕДИЯ

Е.В. ШЕЙКИН^{1,2,✉}

В.Ф. СТЕПАНОВА³, д-р техн. наук

¹ Центральные научно-реставрационные проектные мастерские, Школьная ул., д. 24, г. Москва, 109544, Российская Федерация

² АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

³ 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. В статье рассмотрены особенности распределения влаги в слоистой структуре материалов конструкций объектов культурного наследия. Распределение влаги в пористом материале определяется геометрией порового пространства, поскольку более узкий капилляр отсасывает влагу из более широкого. Исследование характера распределения влажности в слоистой структуре материалов конструкций объектов культурного наследия показывает, что эта закономерность достаточно часто не соблюдается.

Цель. Выявление степени распространенности и причины нарушения физических закономерностей распределения влаги в слоистой структуре материалов конструкций объектов культурного наследия.

Материалы и методы. Представленные исследования получены на основе результатов проведенных авторами испытаний более 2500 образцов материалов из 24 памятников архитектуры разного времени и локаций.

Результаты. Анализ распределения влажности в 413 горизонтальных сечениях на глубину до 50–65 см показывает, что практически в половине случаев направление изменения показателей влажности и среднего размера пор совпадает, что противоречит предполагаемым физическим закономерностям. Высказывается предположение, согласно которому подобное нарушение закономерностей может быть вызвано развитием в исторических конструкциях пустотности, в результате чего формирование влажностных режимов на отдельных участках кладки может формироваться независимо. Для проверки данного предположения была проведена оценка степени пустотности материалов на основании прямых и косвенных показателей. Результаты оценки показали, что в большинстве случаев на участках с предполагаемым нарушением физических закономерностей наблюдаются признаки развитой пустотности. Более того, расширенная оценка в формате всех материалов показала наличие признаков пустотности даже на участках с визуально читаемым «противоходом».

Выводы. На основе проведенного анализа показано, что характер распределения влажности в слоистой структуре материалов конструкций объектов культурного наследия в первую очередь определяется не столько свойствами самих материалов, сколько развитой пустотностью.

Ключевые слова: распределение влажности, размер пор, микрокерны, сорбционные характеристики, слоистые материалы, исторические конструкции, объекты культурного наследия, пустотность

Для цитирования: Шейкин Е.В., Степанова В.Ф. Закономерности распределения влажности в слоистой структуре материалов конструкций объектов культурного наследия. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):84–100. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-84-100](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-84-100)

Вклад авторов

Шейкин Е.В. – сбор и анализ результатов лабораторных испытаний, написание текста статьи.

Степанова В.Ф. – научное руководство, редактирование текста статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.01.2025

Поступила после рецензирования 18.02.2025

Принята к публикации 27.02.2025

MOISTURE DISTRIBUTION PATTERNS OF LAYERED STRUCTURAL MATERIALS IN CULTURAL HERITAGE OBJECTS

E.V. SHEIKIN^{1,2,✉}

V.F. STEPANOVA³, Dr. Sci. (Engineering)

¹ Central Scientific and Restoration Project Workshops, Shkolnaya str., bld. 24, Moscow, 109544, Russian Federation

² JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

³ 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 article examines patterns of moisture distribution in the layered structural materials of cultural heritage objects. The distribution of moisture in a porous material is determined by the geometry of the pore space, since a narrower capillary sucks moisture from a wider one. However, studies of the moisture distribution in the layered structure of materials used for the construction of cultural heritage objects shows that this pattern is often absent.

Aim. To identify the prevalence degree and causes for violation of patterns of moisture distribution in the layered structural materials of cultural heritage objects.

Materials and methods. The presented study includes the results of tests conducted by the authors using more than 2500 samples of materials from 24 architectural monuments of different periods and locations.

Results. An analysis of the moisture distribution in 413 horizontal sections to a depth of 50–65 cm shows the directions of change in the moisture content and average pore size coinciding in almost half of the cases; however, this contradicts the assumed patterns. We suggest that such a violation of the patterns may be caused by the development of voids in historical structures. Due to these voids, humidity modes may develop independently in individual sections of the masonry. To test this assumption, we have assessed the void degree of materials using both direct and indirect indicators. The assessment results have showed that areas with suspected violations of moisture distribution patterns predominantly have developed voids. Moreover, an extended assessment of all materials has proved the presence of voids even in areas with a visually identified counter-flow.

Conclusions. The conducted analysis has demonstrated the pattern of moisture distribution in the layered structural materials of cultural heritage objects to be determined by developed voids rather than by the properties of materials themselves.

Keywords: moisture distribution, pore size, microcores, sorption characteristics, layered materials, historical structures, cultural heritage objects, void factor

For citation: Sheikin E.V., Stepanova V.F. Moisture distribution patterns of layered structural materials in cultural heritage objects. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):84–100. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-84-100](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-84-100)

Authors contribution statement

Sheikin E.V. – collection and analysis of laboratory test results, writing the article.

Stepanova V.F. – scientific supervision, editing of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 13.01.2025

Revised 18.02.2025

Accepted 27.02.2025

Введение

Вопросы формирования влажностного режима во внутреннем пространстве конструкций кладочного типа являются определяющими длительность эксплуатации этих конструкций. Хорошо известно, что оптимальным с точки зрения долговечности является режим, при котором влага распределяется внутри достаточно равномерно и имеет возможность максимально быстро достигать внешней поверхности. Локальная и неравномерная аккумуляция влаги внутри конструкции влечет за собой существенное ускорение процессов деструкции [1].

Распределение влаги в пористом слоистом материале определяется геометрией порового пространства, поскольку с уменьшением диаметра капилляра снижается и гидростатическое давление внутри него. При достижении мениском влаги более узкой поры его скорость замедлится, но на основании физики процесса его проникновение туда физически не ограничено [2]. При обратной ситуации, т. е. при достижении мениском более широкой поры, его дальнейшему проникновению препятствует недостаточность гидростатического давления [3]. Если перепад размеров пор не слишком значителен, то остановка мениска будет временной до тех пор, пока продвижение соседних менисков не приведет к возрастанию гидростатического давления, способного компенсировать недостаток давления в поре [4–8]. В слоистых материалах это приводит, в частности, к тому, что в процессе высыхания вся влага вначале аккумулируется на участках с более мелкими порами, откуда она начинает удаляться только после практически полного опустошения крупнопористых участков [9, 10].

Учитывая сказанное, можно было бы ожидать, что изменение влажности материалов в исторической кладке должно сопровождаться противоположным по направлению изменением

размера пор. Однако на практике такие «противоходы» наблюдаются не всегда, что вызывает вопросы относительно природы и закономерности подобных явлений. В предложенной работе рассматривается, насколько часто наблюдаются указанные «нарушения» физических закономерностей в структуре слоистых материалов конструкций объектов культурного наследия (ОКН), а также проводится анализ возможных причин их возникновения.

Материалы и методы

В работе используются материалы конструкций 24 памятников архитектуры разного времени и локаций. Отбор проб проводился методом сверления трубчатыми сверлами диаметром 10 мм на глубину до 60–65 см [11]. Получаемые образцы представляют собой микрокеры диаметром около 7 мм; длина и формат образцов зависят от состояния отбираемого материала и могут колебаться от качественных цилиндрических кернов длиной 10–20 мм до бесформенных осколков. Наиболее типичные варианты показаны на примере материалов Успенского собора Княгинина монастыря во Владимире (рис. 1–6). Каждая проба состоит из нескольких образцов и ограничивается в среднем 5–6 см по глубине, так что из каждого отверстия получается около 8–12 проб. В одну пробу отбираются только материалы одного вида, в связи с чем при резкой смене материалов размер пробы может значительно сократиться, вплоть до одного образца. Полученные пробы упаковываются в лабораторные боксы с притертой крышкой и герметизируются лентой Parafilm M.



Рис. 1. Успенский собор. Проба с глубины 38,5–47 см. Средний вес образца 0,90 г. Доля материала 0,99
Fig. 1. Assumption Cathedral: depth of 38.5–47 cm, average sample weight of 0.90 g, coverage of 0.99

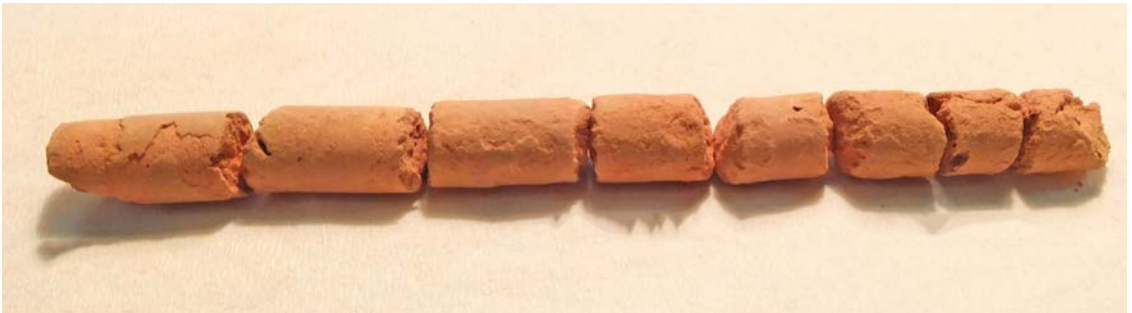


Рис. 2. Успенский собор. Проба с глубины 51,3–61,5 см. Средний вес образца 0,80 г. Доля материала 0,93
Fig. 2. Assumption Cathedral: depth of 51.3–61.5 cm, average sample weight of 0.80 g, coverage of 0.93



Рис. 3. Успенский собор. Проба с глубины 54–59,5 см. Средний вес образца 0,49 г. Доля материала 0,72
Fig. 3. Assumption Cathedral: depth of 54–59.5 cm, average sample weight of 0.49 g, coverage of 0.72



Рис. 4. Успенский собор. Проба с глубины 8,5–16,5 см. Средний вес образца 0,24 г. Доля материала 0,42
Fig. 4. Assumption Cathedral: depth of 8.5–16.5 cm, average sample weight of 0.24 g, coverage of 0.42



Рис. 5. Успенский собор. Проба с глубины 22–28 см. Средний вес образца 0,16 г. Доля материала 0,45
Fig. 5. Assumption Cathedral: depth of 22–28 cm, average sample weight of 0.16 g, coverage of 0.45



Рис. 6. Успенский собор. Проба с глубины 19,7–23 см. Средний вес образца 0,11 г. Доля материала 0,41
Fig. 6. Assumption Cathedral: depth of 19.7–23 cm, average sample weight of 0.11 g, coverage of 0.41

Определение влажности. Оценка естественной влажности образцов проводилась гравиметрическим методом [12–15]. Для взвешивания образцов применялись весы Sartorius GC 803S-OCE с точностью до 4-го знака. Бюксы с пробами освобождались от герметизирующей пленки, взвешивались и высушивались со снятой крышкой до постоянной массы при температуре 105 °С. После сушильного шкафа бюксы закрывались крышками и помещались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, после чего взвешивались. Влажность определялась по следующей формуле:

$$W = \frac{(m_{\text{бв}} - m_{\text{б}}) - (m_{\text{бс}} - m_{\text{б}})}{(m_{\text{бс}} - m_{\text{б}})} \times 100, \quad (1)$$

где W – естественная влажность;

$m_{\text{бв}}$ – масса бюкса с мокрой пробой;

$m_{\text{б}}$ – масса пустого бюкса;

$m_{\text{бс}}$ – масса бюкса с сухой пробой.

Для анализа полученные значения естественной влажности нормализовались относительно значений водопоглощения по следующей формуле:

$$\theta = \frac{W}{B} \times 100, \quad (2)$$

где θ – относительная влажность материалов;

B – водопоглощение, определяемое путем выдерживания образцов в кипящей дистиллированной воде в течение двух часов [12, 16–19]. После кипячения образцы оставались в воде еще на два часа для остывания [18].

Определение сорбционных характеристик. Определение сорбционных характеристик проводилось по эксикаторному методу [20–22]. Параметры воздуха в эксикаторе создавались при помощи насыщенных растворов солей. Для достижения 43 % использовался раствор карбоната калия (K_2CO_3), 63 % – нитрита натрия (NaNO_2), 74 % – нитрат натрия, 85 % – хлорид калия, 98 % – сульфат меди [23]. Время выдержки образцов для достижения равновесия на каждом этапе было определено на основе опыта зарубежных исследователей, в работах которых оно составляет от нескольких часов до нескольких дней для кернов диаметром 2–5 см [24–28]. Поскольку предварительные эксперименты показали, что 72 часов достаточно для достижения равновесия всех наших образцов, то именно этот период был выбран в качестве оптимального. После достижения равновесия образцы высушивались при температуре 105 °С до постоянного веса, располагались на 20 мин в эксикатор с силикагелем для остывания, взвешивались и вновь размещались в эксикаторах с более высокой степенью относительной влажности.

Сорбционные характеристики выражались в формате степени микропористости ($P_{0,1}$), представляющей собой процент сорбционных пор в материале [24, 29]. $P_{0,1}$ определяется по формуле:

$$P_{0,1} = \frac{a_{98}}{B} \times 100, \quad (3)$$

где a_{98} – количество сорбированной влаги при давлении водяного пара 0,98.

Определение сорбционных характеристик всех образцов проводилось дважды. «Первичная» сорбция выполнялась на образцах, прошедших только процедуру определения

естественной влажности, т. е. не изменивших свое состояние. «Вторичная» сорбция проводилась на очищенных от примесей образцах после трех циклов увлажнения/высыхания, где каждый цикл состоял из выдержки в холодной воде в течение 8 часов, а затем в кипящей воде в течение 2 часов. Дистиллированная вода менялась после каждого этапа. Необходимость вторичной сорбции связана с тем, что в неблагоприятных влажностных условиях на отдельных участках скапливается множество примесей (частицы почвы, водорастворимые соли, микрообломки и т. д.), могущих существенно исказить физические свойства материалов, в частности уменьшать пористость, размер пор и увеличивать гигроскопичность. Эти измененные «кажущиеся» свойства важны с той точки зрения, что именно в таком формате данные материалы проявляют себя внутри стены. Однако для определения истинных свойств необходимо очистить поровое пространство от примесей.

Определение среднего размера пор. Средний размер пор образцов (d_{cp}) рассчитывался по формуле [30]:

$$d_{cp} = \frac{V_p \times 4 \times 10^3}{S_{уд}}, \quad (4)$$

$$V_p = \frac{V \times m_0 \times P_0}{100}, \quad (5)$$

где V – объем образца, см³;

V_p – объем пор, см³/г;

$S_{уд}$ – удельная площадь поверхности. Удельная площадь поверхности определялась сравнительным методом [30] по следующей формуле:

$$S_{уд} = \frac{a_{62} - a_{45}}{\alpha_{62} - \alpha_{45}}, \quad (6)$$

где a_{62} – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 62 %, мкмоль/г;

a_{45} – адсорбция исследуемого образца при относительной влажности 45 %, мкмоль/г;

α_{62} – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 62 %, мкмоль/м²;

α_{45} – абсолютная величина адсорбции стандартного образца при относительной влажности 45 %, мкмоль/м².

Абсолютная величина адсорбции определялась по формуле:

$$\alpha_i = \frac{a_i - m_c}{m_c \times S_{уд} \times 0,000018}, \quad (7)$$

где a_i – адсорбция стандартного образца при относительной влажности i , г;

m_c – сухой вес стандартного образца, г.

В качестве стандартных образцов использовались четыре образца исторического кирпича с разными характеристиками пористого пространства. Анализ образцов проводился на кафедре функциональных наносистем и высокотемпературных материалов НИТУ МИСИС методом низкотемпературной адсорбции азота при помощи анализатора удельной поверхности и пористости Quantochrome Nova 1200e.

Результаты

На основании полученных данных было построено 413 зависимостей изменения относительной влажности и среднего размера пор материалов в горизонтальном сечении кладки. Из них только 61 (15 %) демонстрирует противоположный ход влажности и размера пор в формате всего сечения в целом. Еще в 40 случаях (10 %) требуемая закономерность соблюдается при формировании основного абриса рисунка изменения характеристик, но с нарушением на одном или двух участках. Таким образом, только в 25 % случаев наблюдается (относительно) полноценное соблюдение физических закономерностей. С другой стороны, в части контрольных сечений наблюдается преобладание обратной тенденции, с однонаправленным изменением обоих показателей по всей глубине сечения.

Для возможности количественного анализа все данные были переформированы в формат перепадов значений между соседними пробами. Общее количество таких перепадов составило 2645. Поскольку основной интерес вызывала корреляция в рамках достаточно явно выраженных колебаний, то были выбраны только перепады более 15 % по влажности. Всего было зафиксировано 1094 таких перепадов, из которых в 387 случаях, т.е. в 35 %, направление изменения влажности не связано обратной зависимостью с направлением изменения размера пор, как предполагает теория. Еще в 116 случаях имеет место противоположное по направленности изменение среднего размера пор, но с интенсивностью менее чем в два раза. Учет этих случаев также оправдан, поскольку незначительное изменение пористости не может вызвать резкий скачок влажности. Таким образом, практически в половине случаев (46 %) физические закономерности не соблюдаются или соблюдаются не в полной мере.

Указанные проявления могут возникнуть только в случае нарушения гидравлической связи внутри кладки, при котором влажностный режим соседних участков формируется независимо как на стадии увлажнения, так и на стадии высыхания. Нарушение гидравлической связи может возникнуть по причине развития внутри кладки разного вида пустотности, начиная от мельчайших микротрещин и заканчивая крупными макротрещинами, различимыми визуально.

Эндоскопия. Наиболее простой и очевидный метод выявления пустотности в кладке связан с эндоскопическим исследованием полученного отверстия. Однако данный метод имеет ограничения, основным из которых является возможность фиксации только трещин, размеры которых исчисляются в миллиметрах или даже в сантиметрах. Меньшие размеры, как правило, просто затираются шламом в процессе отбора проб и становятся неразличимыми для последующего визуального обследования.

Метод сопротивления сверлению. Второй метод связан с равномерностью прохода пробоотборника в процессе прохода материала. Резкое снижение сопротивления сверлению или локальный «срыв» сверла позволяют не только достаточно точно зафиксировать сам факт присутствия внутренней полости, но и провести ее относительно точное позиционирование по глубине. Несмотря на то что в сравнении с визуальным данный метод позволяет фиксировать более мелкие трещины, тем не менее он остается достаточно грубым, позволяя фиксировать только «хорошо развитые» трещины. Кроме того, степень «точности» данного метода во многом зависит от прочности предшествующего трещине материала. Чем он прочнее, тем четче ощущается «срыв» сверла. И наоборот, чем материал мягче, тем

менее четко воспринимается срыв и, соответственно, увеличивается размер пустотности, которую можно отследить подобным образом.

Доля материала в пробе. Уменьшение полученного при отборе трубочным сверлом количества материала указывает на то, что часть его уже отсутствовала на момент отбора проб либо была деструктирована до порошкообразного состояния в процессе сверления. Если часть материала была утрачена до начала отбора проб, то на данном участке имела место в той или иной степени развитая пустотность. Если же эта часть была утрачена в процессе отбора проб, т. е. в результате воздействия вибраций от вращения корончатого наконечника пробоотборника, то это может свидетельствовать о существовании на данном участке в той или иной степени развитой сети микротрещин. Как первое, так и второе можно интерпретировать в формате пустотности разных стадий развития. При интерпретации результатов мы исходили из допущения, что для констатации подобной формы деструкции (наличия пустотности) достаточно потери более четверти отбираемого материала, на что будет указывать доля материала в пробе (N_m) – менее 0,75.

Средний размер образца в пробе. По тем же соображениям на развитую микротрещиноватость указывает и снижение среднего веса образца в пробе. Траектории разломов образцов в результате воздействия вибраций от сверла, естественно, проходят по наиболее слабым участкам, каковыми являются участки внутренних микротрещин. Колебание длины кернов в пробах само по себе не может служить показателем какой-либо тенденции. Однако таким показателем может служить порог условной трансформации цилиндрического керна в бесформенный осколок. Для практической оценки этот порог возможно фиксировать в весовом формате. В данной работе мы исходили из допущения, что на развитую трещиноватость указывает средний вес образца пробы (G_a) менее 0,2 г (рис. 1–6).

Внутренние зоны испарения. Еще одним косвенным свидетельством развитой микротрещиноватости и пустотности являются внутренние зоны испарения. Обоснованием для данного метода является тот факт, что воздушные прослойки и полости блокируют жидкую влагу, после чего ее перемещение возможно только в виде пара. В результате на участках с развитой пустотностью или на границе материалов со значительным перепадом размера пор влага будет постепенно испаряться, создавая условия для концентрации в пограничной зоне примесей, содержащихся в воде. В качестве таких примесей могут выступать водорастворимые соли, микрообломки и частицы почвы. Концентрация примесей изменяет свойства материалов в направлении возрастания сорбционных характеристик, во-первых, по причине уменьшения размеров пор, во-вторых, по причине значительно большей гигроскопичности солевой части примесей [26]. Отсюда можно сделать вывод, что признаком существования зоны испарения может служить снижение показателей степени микропористости и удельной площади поверхности после очищения образцов от примесей. Снижение первых свидетельствует об изначальном преобладании в материале крупных микропор более 60–70 нм, влияющих на капиллярный конденсат, тогда как снижение вторых будет указывать на изначальное преобладание мельчайших микропор размером в несколько нанометров [29]. Оба фактора являются независимыми друг от друга и могут носить абсолютно непредсказуемый характер (рис. 7–11). Авторы исходили из допущения, что снижение $P_{0,1}$ на 8%, а $S_{уд}$ на 5 м²/г после промывки образцов от примесей (по результатам вторичной сорбции) свидетельствует о наличии зоны испарения.

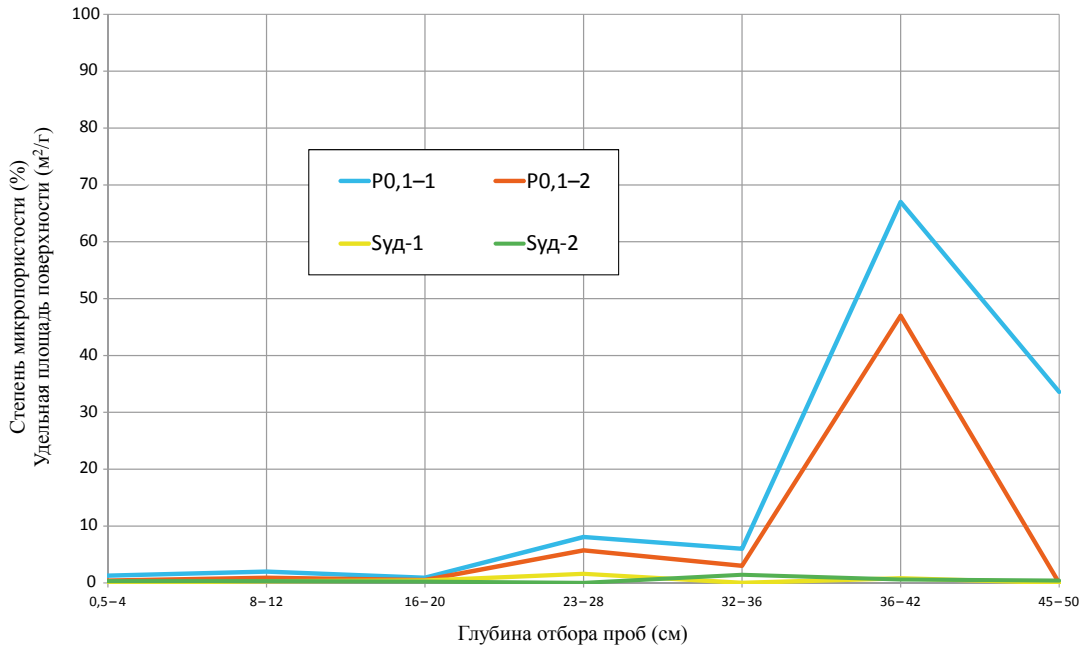


Рис. 7. Георгиевский собор в Юрьеве-Польском. Снижение значений степени микropopористости материалов на высоте 0,1 м по результатам вторичной сорбции

Fig. 7. Saint George Cathedral in Yuryev-Polsky: reduction in the microporosity of materials at a height of 0.1 m based on secondary sorption results

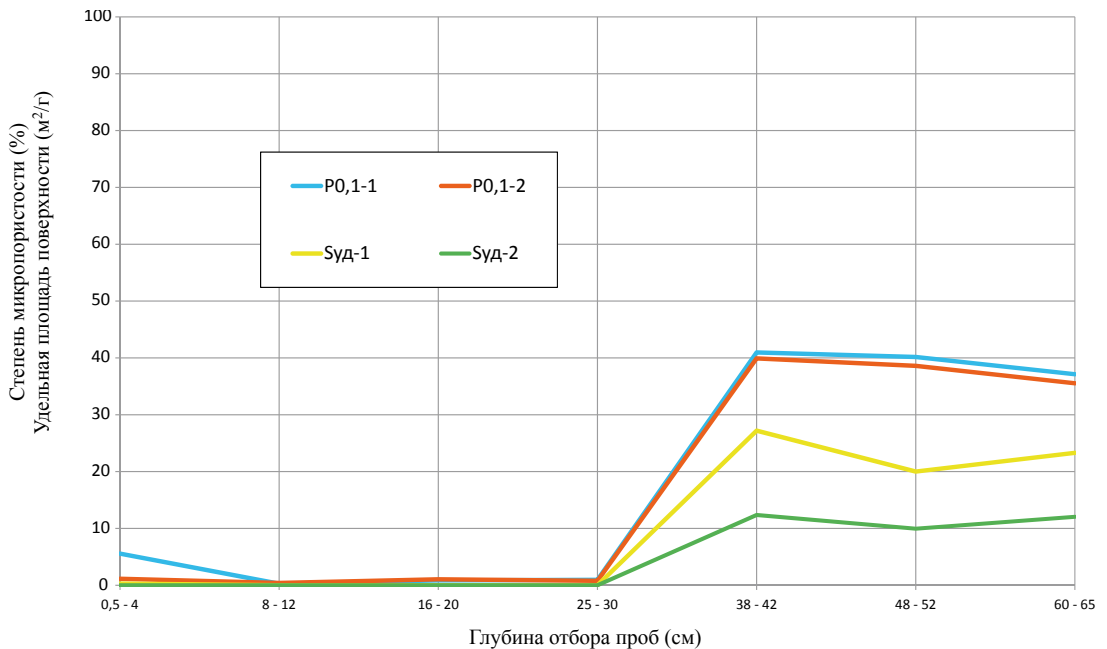


Рис. 8. Георгиевский собор в Юрьеве-Польском. Снижение значений удельной площади поверхности материалов на высоте 0,8 м по результатам вторичной сорбции

Fig. 8. Saint George Cathedral in Yuryev-Polsky: reduction in the specific surface area of materials at a height of 0.8 m based on secondary sorption results

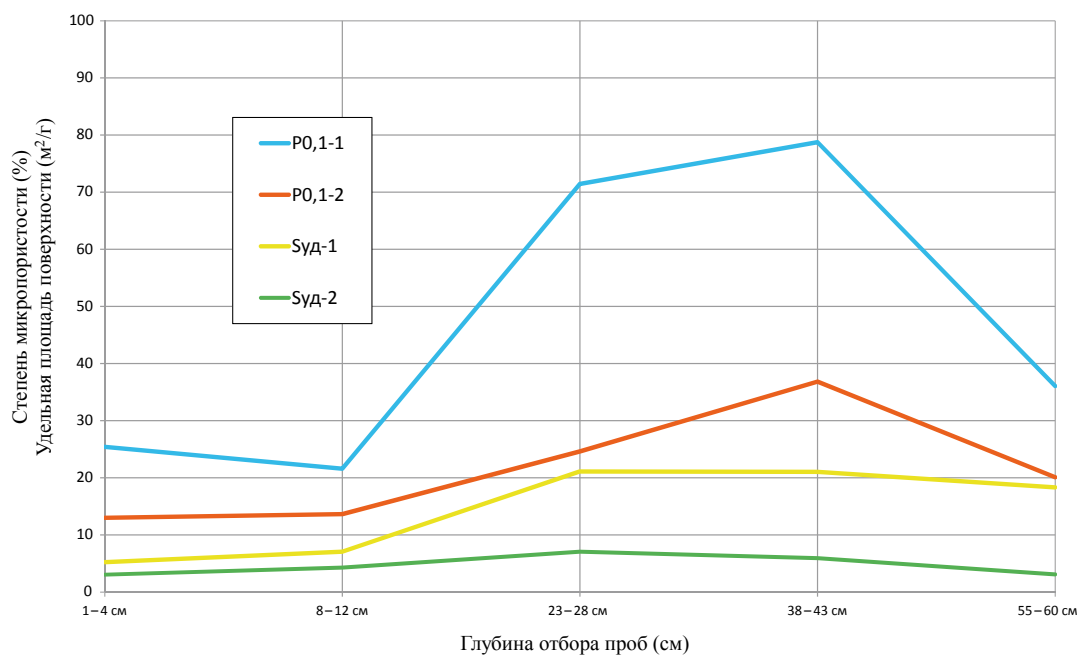


Рис. 9. Подземная палата Архангельского собора Московского Кремля. Снижение сорбционных характеристик материалов на высоте 0,1 м по результатам вторичной сорбции

Fig. 9. Underground chamber of the Cathedral of the Archangel in Moscow Kremlin: reduction in sorption characteristics of materials at a height of 0.1 m based on secondary sorption results

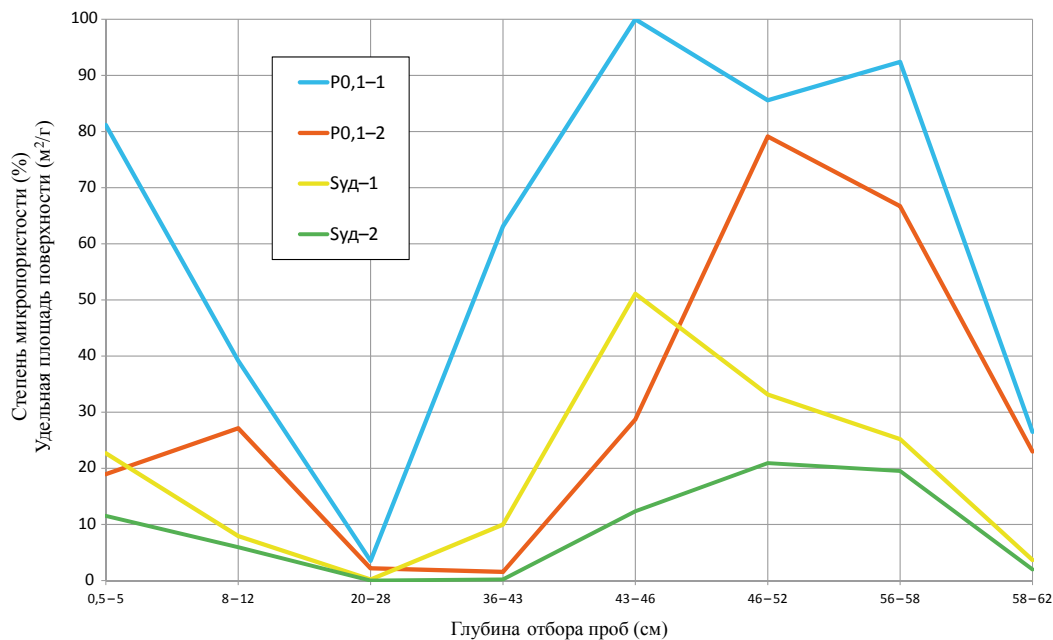


Рис. 10. Успенский собор в Смоленске. Снижение сорбционных характеристик материалов на высоте 1 м по результатам вторичной сорбции

Fig. 10. Assumption Cathedral in Smolensk: reduction in sorption characteristics of materials at a height of 1 m based on secondary sorption results

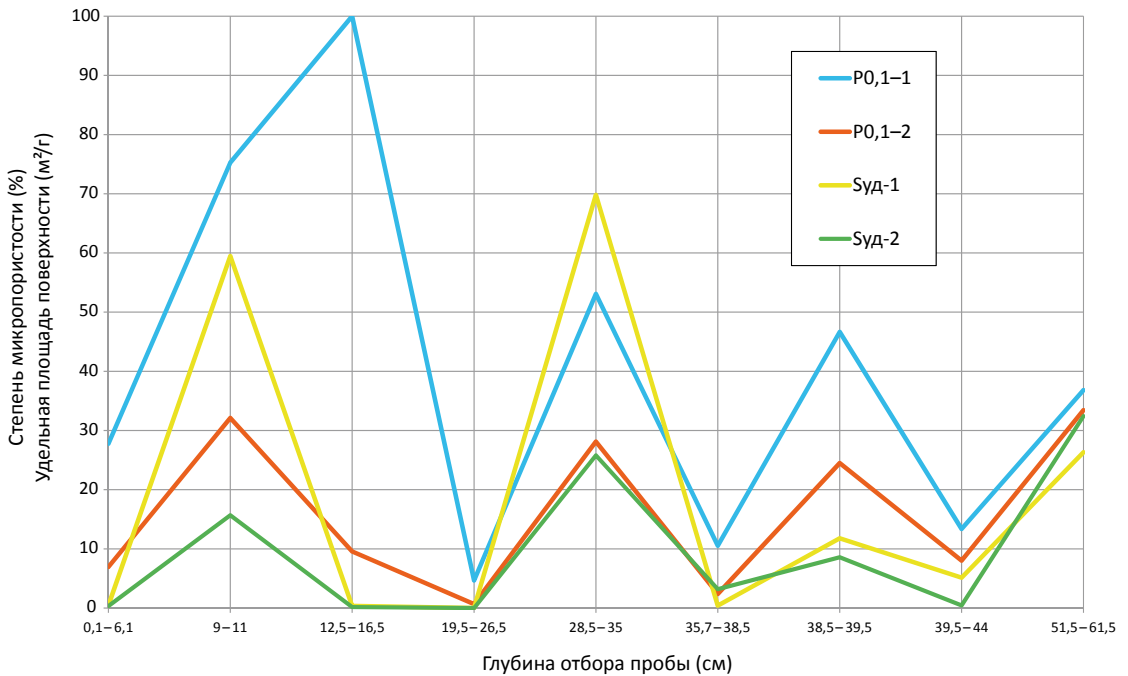


Рис. 11. Успенский собор Княгинина монастыря во Владимире. Снижение сорбционных характеристик материалов на высоте 0,1 м по результатам вторичной сорбции

Fig. 11. Assumption Cathedral of the Knyaginina Monastery in Vladimir: reduction in sorption characteristics of materials at a height of 0.1 m based on secondary sorption results

Основной проблемой интерпретации результатов и, соответственно, данного метода является тот факт, что в процессе циклов увлажнения/высыхания может происходить не только очистка материалов от примесей. Если структура материала ослаблена, то может наблюдаться также и дальнейшее развитие деструкции, в частности развитие и распространение сети микротрещин. В этом случае будут параллельно развиваться два независимых и противоположных по направлению процесса, один из которых будет связан с очищением пор от солей и микрообломков и тем самым направлен на уменьшение гигроскопичности. Тогда как другой будет вызывать дальнейшее увеличение количества микротрещин и тем самым будет стремиться изменить микроструктуру материала в сторону возрастания гигроскопичности. В случае преобладания последнего может наблюдаться возрастание сорбционных характеристик по результатам вторичной сорбции (рис. 12). Снижение показателей по результатам вторичной сорбции однозначно указывает на существование зоны испарения. Возрастание же показателей подразумевает возможность двоякого толкования, поскольку нет возможности оценить, имели ли место оба процесса – снижение сорбционных характеристик в результате очищения пор от примесей и возрастание сорбционных характеристик в результате дальнейшего развития сети микротрещин – или только последний из них, фиксируемый на графике.

Корреляция участков с признаками пустотности и участков с параллельными направлениями изменения влажности и размера пор показана по совпадению обоих критериев на 118 участках, где снижение влажности сопровождается уменьшением среднего размера пор, и 163 участках, где возрастание влажности сопровождается, соответственно,

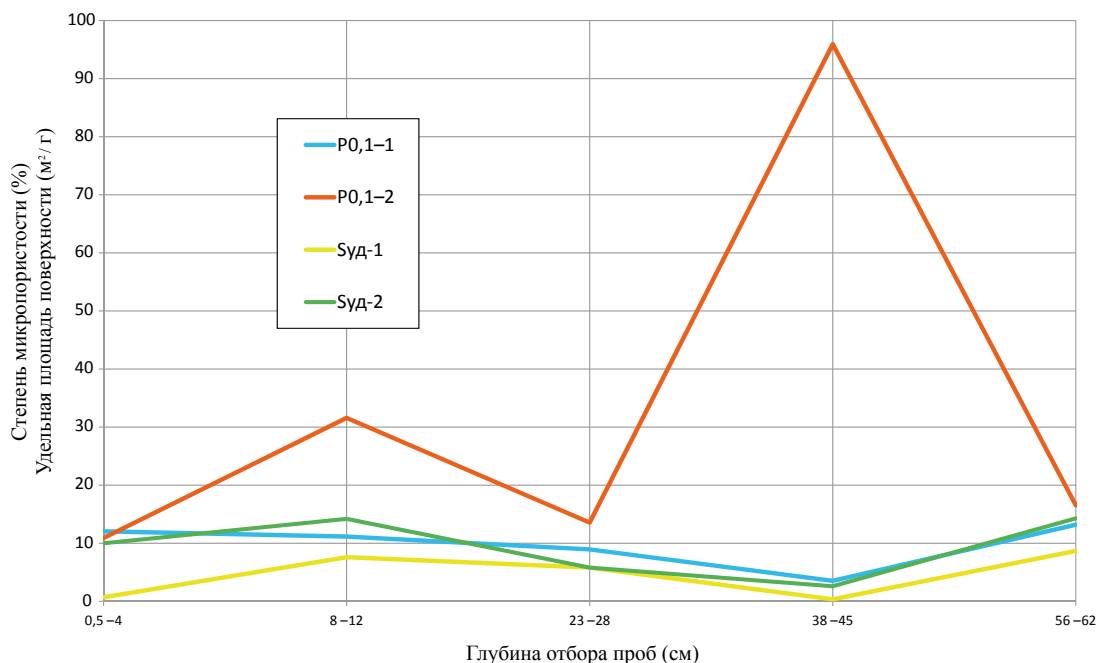


Рис. 12. Троицкий собор в Яхrome. Возрастание степени микропористости материалов на высоте 1 м по результатам вторичной сорбции

Fig. 12. Trinity Cathedral in Yakhroma: increase in the microporosity values of materials at a height of 1 m based on secondary sorption results

увеличением среднего размера пор. Для анализа выбирались только те участки, где перепады по обоим показателям, как по влажности, так и по размеру пор, выражены достаточно явно. Порог перепада по влажности между соседними пробами был выбран более 15 %, по среднему размеру пор – более чем в два раза. Таким образом, всего набрался 281 участок, где динамика показателей влажности и среднего размера пор не соответствует ожидаемой в соответствии с физическими законами. Из 281 участка только на 18-ти, т. е. менее 6 %, не прослеживается каких-либо признаков, указывающих на существование внутренней пустотности.

Полученные результаты позволяют предположить, что даже на тех участках, где прослеживается зависимость между влажностью и средним размером пор в виде визуально наблюдаемого «противохода», данная зависимость может быть не более чем совпадением, тогда как на самом деле влажностные режимы данных участков являются независимыми и формируются под влиянием развитой пустотности. Это предположение косвенно подтверждается совокупной оценкой всех 2645 перепадов, показывающей, что только 245 из них, т. е. менее 9 %, не имеют каких-либо явных признаков микротрещиноватости. В качестве наглядной иллюстрации данного вывода могут служить участки, где противоход параметров влажности и среднего размера пор накладывается на макротрещину, фиксируемую прямым методом эндоскопии.

Выводы

Проведенный анализ распределения влажности в слоистой структуре материалов конструкций ОКН на базе 24 памятников архитектуры и 413 горизонтальных сечений на глубину до 50–65 см показывает, что практически в половине случаев направление изменения показателей влажности и среднего размера пор совпадает, что противоречит предполагаемым физическим закономерностям.

Подобное нарушение закономерностей может быть вызвано развитием в слоистой структуре материалов конструкций ОКН пустотности, в результате которого формирование влажностных режимов на отдельных участках кладки может происходить независимо. Для проверки данного предположения была осуществлена оценка степени пустотности материалов на основании прямых и косвенных показателей. Результаты оценки показали, что в большинстве случаев на участках с предполагаемым нарушением физических закономерностей наблюдаются признаки развитой пустотности. Более того, расширенная оценка в формате всех материалов показала наличие признаков пустотности даже на участках с визуально читаемым «противоходом».

Из сказанного можно сделать вывод, что характер распределения влажности в слоистой структуре материалов конструкций ОКН определяется не столько свойствами самих материалов, сколько развитой пустотностью.

Список литературы

1. Bost M., Pouya A., Guédon S. Influence du réseau poreux sur l'altération par le gel des massifs calcaires fractures. *Revue Française de Géotechnique*. 2010;133:3–9. <https://doi.org/10.1051/geotech/2010133003>
2. Salles M., Torga J., Morel E., Budini N., Urteaga R. Optical coherence tomography measurement of capillary filling in porous silicon. *Journal of Applied Physics*. 2020;128(2):024701. <https://doi.org/10.1063/1.5145270>
3. Лыков М.В. Теория сушки. Москва: Энергия; 1968.
4. Gruener S., Sadjadi Z., Hermes H.E., Kityk A.V., Knorr K., Egelhaaf S.U., Rieger H., Huber P. Anomalous front broadening during spontaneous imbibition in a matrix with elongated pores. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012;109(26):10245–10250. <https://doi.org/10.1073/pnas.1119352109>
5. Rieger H., Thome C., Sadjadi Z. Meniscus arrest dominated imbibition front roughening in porous media with elongated pores. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015;638:012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/638/1/012007>
6. Sadjadi Z., Jung M., Seemann R., Rieger H. Meniscus arrest during capillary rise in asymmetric microfluidic pore junctions. *Langmuir*. 2015;31(8):2600–2608. <https://doi.org/10.1021/la504149r>
7. Sadjadi Z., Rieger H. Scaling theory for spontaneous imbibition in random networks of elongated pores. *Physical Review Letters*. 2013;110(14). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.110.144502>
8. Mehrabian H., Gao P., Feng J.J. Wicking flow through microchannels. *Physics of Fluids*. 2011;23(12). <https://doi.org/10.1063/1.3671739>
9. Shokri N., Lehmann P., Or D. Evaporation from layered porous media. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2010;115(B6). <https://doi.org/10.1029/2009JB006743>
10. Pillai K.M., Prat M., Marcoux M. A study on slow evaporation of liquids in a dual-porosity porous medium using square network model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(7–8):1643–1656. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.007>
11. Шейкин Е.В. Исследование влажностного режима конструкций памятников архитектуры методом отбора микрокернов. В: Исследования в консервации культурного наследия. Материалы Международной научно-методической конференции. Вып. 5. Москва: Принт; 2019, с. 287–302.
12. ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ; 2018.

13. ГОСТ 12730.2-2020. Бетоны. Метод определения влажности. Москва: Стандартинформ; 2021.
14. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Стандартинформ; 2016.
15. ГОСТ 33028-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Определение влажности. Москва: Стандартинформ; 2016.
16. ГОСТ 7025-91. Кирпич и камни керамические и силикатные. Методы определения водопоглощения, плотности и контроля морозостойкости. Москва: Стандартинформ; 2006.
17. Korothe S.R. Evaluation and Improvement of Frost Durability of Clay Bricks [PhD thesis]. Montreal Canada: Concordian Univeristy; 1997.
18. Vieira A.W., Innocentini M.D. de M., Mendes E., Gomes T., Demarch A., Montedo O.R.K., Angioletto E. Comparison of Methods for Determining the Water Absorption of Glazed Porcelain Stoneware Ceramic Tiles. *Materials Research*. 2017;20[suppl 2]:637–643. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0089>
19. Wilson M.A., Carter M.A., Hoff W.D. British standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation. *Materials and Structures*. 1999;32(8):571–578. <https://doi.org/10.1007/bf02480491>
20. Сизов Б.Т. Сохранение памятников из камня на открытом воздухе [диссертация]. Москва; 1998.
21. ГОСТ 24816-81. Материалы строительные. Метод определения сорбционной влажности. Москва: Издательство стандартов; 1981.
22. ГОСТ 24816-2014. Материалы строительные. Метод определения равновесной сорбционной влажности. Москва: Стандартинформ; 2015.
23. Терещенко А.Г. Относительная влажность воздуха над насыщенными растворами солей. Достоверность данных. Томск: Томский политехнический университет; 2010.
24. Rigbey S. The effect of sorbed water on expansivity and durability of rock aggregates [Thesis]. Ontario: University of Windsor; 1980.
25. Rogers C.A. The effect of de-icing agents on water adsorption phenomena in rock aggregates [Master Thesis]. Ontario: University of Windsor; 1977.
26. Sawdy A. The kinetics of salt weathering of porous materials. Stone monuments and wall paintings [PhD Thesis]. London: Institute of Archaeology University College; 2001.
27. Pimienta L., Fortin J., Guéguen Y. Investigation of elastic weakening in limestone and sandstone samples from moisture adsorption. *Geophysical Journal International*. 2014;199(1):335–347. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu257>
28. Yurikov A., Lebedev M., Gor G.Y., Gurevich B. Sorption-Induced Deformation and Elastic Weakening of Bentheim Sandstone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018;123(10):8589–8601. <https://doi.org/10.1029/2018jb016003>
29. Bourges Ann. Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment. München: Ludwigs-Maximilians-Universität; 2006.
30. Карнаухов А.П. Адсорбция. Текстура дисперсных и пористых материалов. Новосибирск: Наука; 1999.

References

1. Bost M., Pouya A., Guédon S. Influence du réseau poreux sur l'altération par le gel des massifs calcaires fractures. *Revue Française de Géotechnique*. 2010;133:3–9. <https://doi.org/10.1051/geotech/2010133003>
2. Sallèse M., Torga J., Morel E., Budini N., Urteaga R. Optical coherence tomography measurement of capillary filling in porous silicon. *Journal of Applied Physics*. 2020;128(2):024701. <https://doi.org/10.1063/1.5145270>
3. Lykov M.V. Drying theory. Moscow: Energiya Publ.; 1968. (In Russian).
4. Gruener S., Sadjadi Z., Hermes H.E., Kityk A.V., Knorr K., Egelhaaf S.U., Rieger H., Huber P. Anomalous front broadening during spontaneous imbibition in a matrix with elongated pores. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 2012;109(26):10245–10250. <https://doi.org/10.1073/pnas.1119352109>
5. Rieger H., Thome C., Sadjadi Z. Meniscus arrest dominated imbibition front roughening in porous media with elongated pores. *Journal of Physics: Conference Series*. 2015;638:012007. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/638/1/012007>
6. Sadjadi Z., Jung M., Seemann R., Rieger H. Meniscus arrest during capillary rise in asymmetric microfluidic pore junctions. *Langmuir*. 2015;31(8):2600–2608. <https://doi.org/10.1021/la504149r>

7. *Sadjadi Z., Rieger H.* Scaling theory for spontaneous imbibition in random networks of elongated pores. *Physical Review Letters*. 2013;110(14). <https://doi.org/10.1103/physrevlett.110.144502>
8. *Mehrabian H., Gao P., Feng J.J.* Wicking flow through microchannels. *Physics of Fluids*. 2011;23(12). <https://doi.org/10.1063/1.3671739>
9. *Shokri N., Lehmann P., Or D.* Evaporation from layered porous media. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2010;115(B6). <https://doi.org/10.1029/2009JB006743>
10. *Pillai K.M., Prat M., Marcoux M.* A study on slow evaporation of liquids in a dual-porosity porous medium using square network model. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009;52(7-8):1643–1656. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2008.10.007>
11. *Sheikin E.V.* Study of the humidity regime of architectural monument structures using the microcore sampling method. In: *Research in the conservation of cultural heritage. Proceedings of the International scientific and methodological conference. Issue 5.* Moscow: Print Publ.; 2019, pp. 287–302. (In Russian).
12. State Standard 5802-86. Mortars. Test methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
13. State Standard 12730.2-2020. Concretes. Method of determination of moisture content. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. (In Russian).2021.
14. State Standard 5180-2015. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (In Russian).
15. State Standard 33028-2014. Automobile roads of general use. Crushed stone and gravel from rocks. Determination of moisture. Moscow: Standartinform Publ.; 2016. (In Russian).
16. State Standard 7025-91. Ceramic and calcium silicate bricks and stones. Methods for water absorption and density determination and frost resistance control. Moscow: Standartinform Publ.; 2006. (In Russian).
17. *Koroth S.R.* Evaluation and Improvement of Frost Durability of Clay Bricks [PhD thesis]. Montreal Canada: Concordian Univeristy; 1997.
18. *Vieira A.W., Innocentini M.D. de M., Mendes E., Gomes T., Demarch A., Montedo O.R.K., Angioletto E.* Comparison of Methods for Determining the Water Absorption of Glazed Porcelain Stoneware Ceramic Tiles. *Materials Research*. 2017;20[suppl 2]:637–643. <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2017-0089>
19. *Wilson M.A., Carter M.A., Hoff W.D.* British standard and RILEM water absorption tests: A critical evaluation. *Materials and Structures*. 1999;32(8):571–578. <https://doi.org/10.1007/bf02480491>
20. *Sizov B.T.* Preservation of Stone Monuments in the Open Air [Dissertation]. Moscow; 1998. (In Russian).
21. State Standard 24816-81. Building materials. Method of hygroscopic moisture determination. Moscow: Publishing House of Standards; 1981. (In Russian).
22. State Standard 24816-2014. Building materials. Method of equilibrium hygroscopic moisture determination. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
23. *Tereshchenko A.G.* Relative Air Humidity over Saturated Salt Solutions. *Data Reliability*. Tomsk: Tomsk Polytechnic University; 2010. (In Russian).
24. *Rigbey S.* The effect of sorbed water on expansivity and durability of rock aggregates [Thesis]. Ontario: University of Windsor; 1980.
25. *Rogers C.A.* The effect of de-icing agents on water adsorption phenomena in rock aggregates [Master Thesis]. Ontario: University of Windsor; 1977.
26. *Sawdy A.* The kinetics of salt weathering of porous materials. Stone monuments and wall paintings [PhD Thesis]. London: Institute of Archaeology University College; 2001.
27. *Pimienta L., Fortin J., Guéguen Y.* Investigation of elastic weakening in limestone and sandstone samples from moisture adsorption. *Geophysical Journal International*. 2014;199(1):335–347. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu257>
28. *Yurikov A., Lebedev M., Gor G.Y., Gurevich B.* Sorption-Induced Deformation and Elastic Weakening of Bentheim Sandstone. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2018;123(10):8589–8601. <https://doi.org/10.1029/2018jb016003>
29. *Bourgès Ann.* Holistic correlation of physical and mechanical properties of selected natural stones for assessing durability and weathering in the natural environment. München: Ludwigs-Maximilians-Universität; 2006.
30. *Karnaukhov A.P.* Adsorption. Texture of dispersed and porous materials. Novosibirsk: Nauka Publ.; 1999. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Евгений Валерьевич Шейкин✉, начальник сектора диагностики влажностного и структурного состояния конструкций, Центральные научно-реставрационные проектные мастерские; соискатель, АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: evg.sheykin@gmail.com

Evgenii V. Sheikin✉, Sectoral Head, Sector for Diagnostics of Moisture and Structural Condition of Structures, Central Scientific and Restoration Project Workshops, Moscow; Applicant, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: evg.sheykin@gmail.com

Валентина Федоровна Степанова, научный руководитель лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Valentina F. Stepanova, Deputy Head for Research, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: vfstepanova@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ МНОГОЛОПАСТНЫХ ВИНТОВЫХ СВАЙ С ПЕСЧАНЫМ ОСНОВАНИЕМ

А.Г. АЛЕКСЕЕВ^{1,2,3}, д-р техн. наук
С.А. ВИНОГРАДОВА^{1,2,✉}

¹ Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

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

³ АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Перспективным направлением в настоящий момент является использование в качестве фундаментов многолопастных винтовых свай. Однако существует ряд проблем для активного их внедрения в строительство, одной из которых является ограничение применения нормативной методики определения несущей способности винтовых свай. Для решения указанной проблемы необходимо изучение характера взаимодействия различных типов винтовых свай с различными разновидностями дисперсных грунтов, с дальнейшей разработкой методики расчета по несущей способности и деформациям и установлением конструктивных требований.

Цель. Изучение работы двух- и трехлопастных винтовых свай на опытной площадке г. Дзержинска с песчаным основанием при действии сжимающей и выдергивающей нагрузок и оценка эффективности применения данных свай в песчаных грунтах с определением их несущей способности.

Материалы и методы. Оценивались результаты полевых испытаний и численного моделирования многолопастных винтовых свай различных типоразмеров в специализированном геотехническом комплексе Plaxis 2D с использованием упругопластической модели грунта Кулона – Мора.

Результаты. По результатам экспериментальных исследований для многолопастных винтовых свай разница между значениями несущей способности на вдавливающую и выдергивающую нагрузки составляет 50–90 % при одинаковой глубине заложения последней лопасти. При увеличении типоразмера трехлопастной сваи на 30 % несущая способность возрастает на 8 %, а при увеличении на 70 % она возрастает на 57 %, при этом при увеличении типоразмера двухлопастной сваи на 48 % несущая способность возрастает на 5 %. Полученные по итогам численных расчетов значения несущей способности многолопастной винтовой сваи в основном находятся в пределах допустимого отклонения, обеспечивая запас до 30 %.

Выводы. На основе анализа опытных данных сделан вывод, что рациональным конструктивным решением в песчаных грунтах является применение винтовых металлических двухлопастных свай с шагом лопасти $5,0D$ и соотношением d/D , равное 0,66. При определении несущей способности многолопастной винтовой сваи численным методом рекомендуется учитывать разрыхление грунтов при прорезке его лопастями сваи или при нарушении технологии их устройства.

Ключевые слова: винтовые сваи, многолопастные винтовые сваи, песчаное основание, несущая способность свай, моделирование свай, численные методы

Для цитирования: Алексеев А.Г., Виноградова С.А. Взаимодействие многолопастных винтовых свай с песчаным основанием. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):101–112. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-101-112](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-101-112)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.02.2025

Поступила после рецензирования 02.04.2025

Принята к публикации 17.04.2025

INTERACTION OF MULTI-BLADE SCREW PILES WITH A SANDY BASE

A.G. ALEKSEEV^{1,2,3}, Dr. Sci. (Engineering)

S.A. VINOGRADOVA^{1,2,✉}

¹ *Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

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

³ *JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation*

Abstract

Introduction. Foundations made of multi-blade screw piles represent a promising direction in construction. However, one of the difficulties preventing their wide spread in construction involves the limits of the standard methodology for determining the bearing capacity of screw piles. This problem can be solved based on a study of interaction between various types of screw piles and dispersed soils, followed by the development of a method for calculating bearing capacity and deformations, as well as establishing design requirements.

Aim. To study the interaction of two- and three-bladed screw piles at a test site in Dzerzhinsk, Russian Federation, with a sandy base under the action of pressing and pulling loads; to assess the effectiveness of these piles in sandy soils based on their bearing capacity.

Materials and methods. We use the Plaxis 2D specialized geotechnical complex with the Coulomb-Mohr elastic-plastic soil model to assess the results of field tests and numerical simulation for multi-blade screw piles of various sizes.

Results. Experimental studies of multi-blade screw piles have demonstrated 50–90 % difference between the bearing capacity for pressing and pulling loads at the same depth of the last blade. At an increase in the size of a three-blade pile by 30 and 70 %, the bearing capacity increases by 8 and 57 %, respectively; an increase in the size of a two-blade pile by 48 % increases the bearing capacity by 5 %. The numerically calculated values of the bearing capacity for a multi-blade screw pile are generally within the permissible deviation with 30 % margin.

Conclusions. The analysis of experimental data proves that screw two-blade metal piles with a blade pitch of $5.0D$ and d/D ratio of 0.66 represents an appropriate design solution for sandy soils. The numerical determination of bearing capacity for a multi-blade screw pile should take into account the loosening of soils cut through with pile blades, as well as the violation of the installation technology.

Keywords: screw piles, multi-blade screw piles, sandy base, pile bearing capacity, pile simulation, numerical methods

For citation: Alekseev A.G., Vinogradova S.A. Interaction of multi-blade screw piles with a sandy base. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):101–112. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-101-112](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-101-112)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 03.02.2025

Revised 02.04.2025

Accepted 17.04.2025

Введение

При проектировании оснований и фундаментов в сложных грунтовых условиях предпочтение отдают свайным фундаментам. Создание гидромоторов с крутящим моментом более 700 кНм в настоящее время позволяет использовать в качестве фундаментов винтовые сваи в различных геологических условиях. Гидромоторы возможно установить на любую строительную технику с гидравлическим приводом, поэтому использование винтовых свай при линейном строительстве, таком как нефте- и газопроводы, имеет большие перспективы. Протяженность трубопроводов может составлять сотни километров и проходить через разные зоны с разными типами грунтов, где часто встречается совокупность проблем, таких как сложные геологические условия: участки с островной, сплошной мерзлотой или участки с тальми грунтами и глубоким залеганием мерзлых грунтов (от 15 м и более), труднодоступными и труднопроходимыми ландшафтами, поэтому применение винтовых свай является достаточно перспективным решением.

Применение винтовых свай в строительстве имеет ряд преимуществ: исключение «мокрых процессов», эффективное сопротивление касательным силам морозного пучения, малые сроки монтажа и минимальное нарушение структуры грунта при завинчивании.

В статье [1] изложены основные проблемы применения винтовых свай, а именно:

- ограничение применения нормативной методики определения несущей способности винтовых свай только для одно- и широколопастных с глубиной заложения лопасти более $6D$ в песчаном основании и $5D$ в глинистом основании, изложенной в СП 24.13330.2021 [2], и отсутствие методик расчета других типов винтовых свай;
- отсутствие методики расчета вертикальных деформаций основания винтовых свай от действия вертикальной нагрузки и учета группового эффекта;
- усовершенствование технологии устройства винтовой сваи для минимизации разрыхления грунтов при прорезке его лопастями и учет данного фактора при расчете несущей способности и оценки деформаций основания винтовых свай под нагрузкой;

– сложность в расчете долговечности материала сваи и сварного соединения лопасти и ствола сваи.

Для решения данных проблем необходимо изучить характер взаимодействия различных типов винтовых свай с различными разновидностями дисперсных грунтов, с дальнейшим установлением конструктивных требований и разработкой методики расчета по несущей способности и деформациям.

Основные типы винтовых свай, применяемые в строительстве, подробно представлены в [1, 3]. В 60-х годах прошлого века одними из первых ученых, изучавших взаимодействие однолопастных винтовых свай, были Ю. Г. Трофименков и Л. Г. Мариупольский [4]. Авторами проведено свыше 200 испытаний различных типоразмеров однолопастных винтовых свай в глинистых и песчаных грунтах и разработана методика расчета несущей способности однолопастной винтовой сваи, вошедшая в нормативный документ [2]. В последующем исследования продолжил В. Н. Железков [5], его разработки поспособствовали широкому использованию однолопастных винтовых свай при строительстве мостов, причалов и других сооружений на слабых грунтах. В настоящий момент исследования взаимодействия винтовых широколопастных свай с многолетнемерзлыми грунтами ведутся такими учеными, как А. Г. Алексеев [3, 6–8], А. А. Звездов [6], а изучением работы спиральных винтовых свай, в том числе в пучинистых грунтах, занимаются А. Г. Алексеев, В. Ф. Акопян [9, 10], А. В. Свицерских [7]. В рассмотренных работах [6, 7] решаются вопросы оценки несущей способности указанных свай на основании данных лотковых испытаний модельных свай и полевых испытаний натурных свай.

Изучением взаимодействия коротких (длиной до 3,0 м) двух- и однолопастных винтовых свай диаметром лопасти $D = 0,3$ м, соотношением $d/D = 0,36$, глубиной заложения лопасти от планировочной отметки менее $5D$, с глинистым основанием занимались А. И. Полищук и Ф. А. Максимов [11, 12]. Авторами разработан метод расчета осадки винтовых двухлопастных металлических свай и рекомендации по расчету и конструированию винтовых двухлопастных свай в глинистых грунтах для фундаментов быстровозводимых временных зданий.

Основная часть

В работе рассматриваются многолопастные винтовые сваи. Изучением взаимодействия двух- и трехлопастных винтовых свай с глинистым основанием под сжимающей и выдерживающей нагрузками занимаются А. Г. Алексеев и С. Г. Безволев [3]. В статье [3] изложены требования и рекомендации проведения численного моделирования и проводится анализ особенностей напряженного состояния грунта в зоне между лопастями. В продолжение данной статьи в [8] рассмотрены результаты расчетов несущей способности многолопастных винтовых свай на действие вдавливающей нагрузки по трем различными методикам (методики, изложенные в пп. 7.2.6–7.2.10 [2], и канадская методика, предложенная Narasimha et al.) с сопоставлением с результатами численного моделирования и опытными данными. Канадская методика показала наилучшую корреляцию с полевыми данными. В дальнейшем по наработкам [6, 7] была сформирована методика выполнения численных расчетов по определению несущей способности многолопастных винтовых свай, представленная в [3].

Целью данной работы является изучение работы двух- и трехлопастных винтовых свай на опытной площадке г. Дзержинска с песчаным основанием при действии сжимающей

и выдергивающей нагрузок и оценка эффективности применения данных свай в песчаных грунтах с определением их несущей способности.

Рассматриваемая площадка сложена до глубины 15 м среднечетвертичным песчаным аллювием (aQ_{III}). По данным гранулометрического анализа, пески мелкие и средней крупности по составу сравнительно однородные, с малым содержанием крупнообломочных и глинистых фракций. Данные о физико-механических свойствах грунтов, используемых для расчетов, представлены в табл. 1. Для численного моделирования испытаний свай принимаются нормативные характеристики грунтов в соответствии с выводами статей [3, 9].

В настоящей работе рассматривается 5 различных типоразмеров свай, применяемых при промышленном строительстве. Характеристики рассматриваемых многолопастных винтовых свай представлены в табл. 2. Всего проведено 24 испытания статистической вдавливающей и выдергивающей нагрузками. Численное моделирование проведено для 10 расчетных схем, при этом в 5 вариантах рассматривалась работа сваи под действием вдавливающей нагрузки, а в других – под действием выдергивающей нагрузки.

У каждого типоразмера винтовой сваи диаметры лопастей D , шаг лопасти и шаг между лопастями S у трехлопастных винтовых свай принимались одинаковыми. При этом отношение между диаметром ствола и диаметром лопасти d/D в основном составляло 0,66, только

Таблица 1

Физико-механические свойства грунтов исследуемой площадки

Table 1

Physical and mechanical properties of soils at the studied site

№ ИГЭ	Песок плотный	Природная влажность, W , д. е.	Плотность, ρ , г/см ³	Коэффициент пористости, e	Коэффициент Пуассона, μ	Модуль деформации, E , МПа	Угол внутреннего трения, φ , град	Сцепление, c , кПа
1	Мелкие маловлажные	0,15	2,10	0,45	0,3	35	38	6
2	Средней крупности маловлажные и влажные	0,04	1,87	0,48	0,3	39	38	3

Таблица 2

Геометрические параметры рассматриваемых свай

Table 2

Geometrical parameters of the studied piles

№	Усл. обознач.	d , мм	t , мм	N_L	D , мм	R , мм	S , мм	S_{pr} , мм	H , мм	L , мм	L_{pr} , мм
1	СВТ1.1/СВТ1.2	89	6	3	140	10	760	1520	3330	5500	5000
2	СВТ2.1/СВТ2.2	114	8	3	180	16	988	1976	2074	4700	4200
3	СВТ3.1/СВТ3.2	159	8	3	240	16	1368	2736	914	4400	3900
4	СВД1.1/СВД1.2/	219	8	2	330	16	1368	1368	2282	4400	3900
5	СВД2.1	325	8	2	490	20	2432	2432	768	4100	3600
6	СВД2.2	325	8	2	490	20	2432	2432	968	4300	3800

Примечание: СВТ1.1/СВТ1.2 – свая винтовая трехлопастная № 1, при этом индекс 1.1 обозначает, что свая типоразмером № 1 воспринимает сжимающие нагрузки, а 1.2 – свая типоразмером № 1, воспринимает выдергивающие нагрузки. СВД1.1 – свая винтовая двухлопастная № 1, индексы аналогичны трехлопастной.

для винтовых свай СВТ1 и СВТ2 оно составляло 0,64 и 0,63 соответственно, отношение шага между лопастями к диаметру лопасти S/D варьировалось от 4,1 до 5,7. Глубина заложения первой лопасти H от планировочной отметки составляла от 1,6D до 6,9D для двухлопастных свай и от 3,8D до 23,8D для трехлопастных свай.

Инженерно-геологические условия рассматриваемой площадки выдержаны по глубине на всей ее площади. Каждый типоразмер винтовой сваи привязывался к инженерно-геологической скважине. Результат привязки представлен на рис. 1.

Регламентированных в нормах [2] методик определения несущей способности винтовых свай F_d всего четыре:

- по формуле 7.17 [2] для винтовых однолопастных свай диаметром лопасти до 1,2 м и длиной до 10 м включительно, работающей на вдавливающую или выдергивающую нагрузки;
- по данным испытаний сваи статической нагрузкой;
- по результатам статического зондирования;
- по результатам численных расчетов в нелинейной постановке с использованием апробированных моделей грунта.

Для изучения работы двух- и трехлопастных винтовых свай с песчаным основанием при действии вертикальных нагрузок используются результаты статистических испытаний свай вдавливающей и выдергивающей нагрузками в соответствии с ГОСТ 5686-2020 [13] и результатов численных расчетов в нелинейной постановке с учетом методики, изложенной в [3, 9].

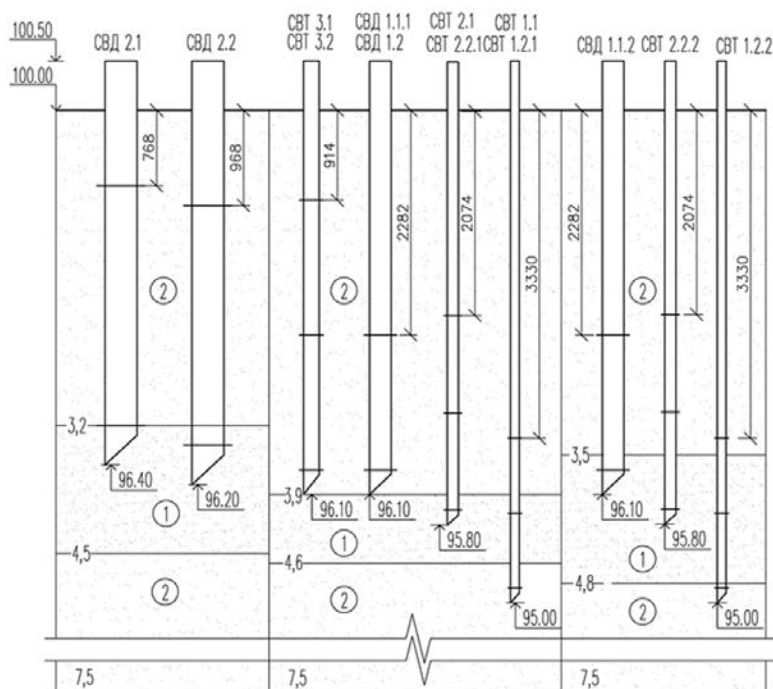


Рис. 1. Расчетные схемы
 Fig. 1. Calculation schemes

В настоящей работе, как это было указано в [9], за частное предельное значение несущей способности многолопастной винтовой сваи, воспринимающей вдавливающие и выдергивающие нагрузки, принималось значение нагрузки, под воздействием которого свая получала осадку, равную $0,1D$, и выход $0,05D$, где D – диаметр лопасти.

Результаты испытаний многолопастных свай на вдавливающую и выдергивающую нагрузки представлены на рис. 2.

При оценке взаимодействия винтовых свай с основанием, в основном сложенным песком средней крупности, маловлажным плотным, можно сделать следующие выводы:

- для многолопастных свай разница между значением несущей способности на вдавливающую и выдергивающую нагрузки составляет 50–90 %;
- при шаге лопастей S , кратному $4,1D$ – $5,0D$, увеличении типоразмера двухлопастной сваи (диаметра лопасти, вала, расстояния между лопастями) на 48 % и уменьшении глубины заложения H первой лопасти на 2–8 % несущая способность практически не изменяется, с разницей в 5 %;
- при одинаковой глубине заложения нижней лопасти, шаге лопастей S , кратному $5,5D$, и увеличении типоразмера трехлопастной сваи на 30 % несущая способность практически не изменяется, а при увеличении типоразмера трехлопастной сваи на 80 % несущая способность увеличивается на 35–55 %;

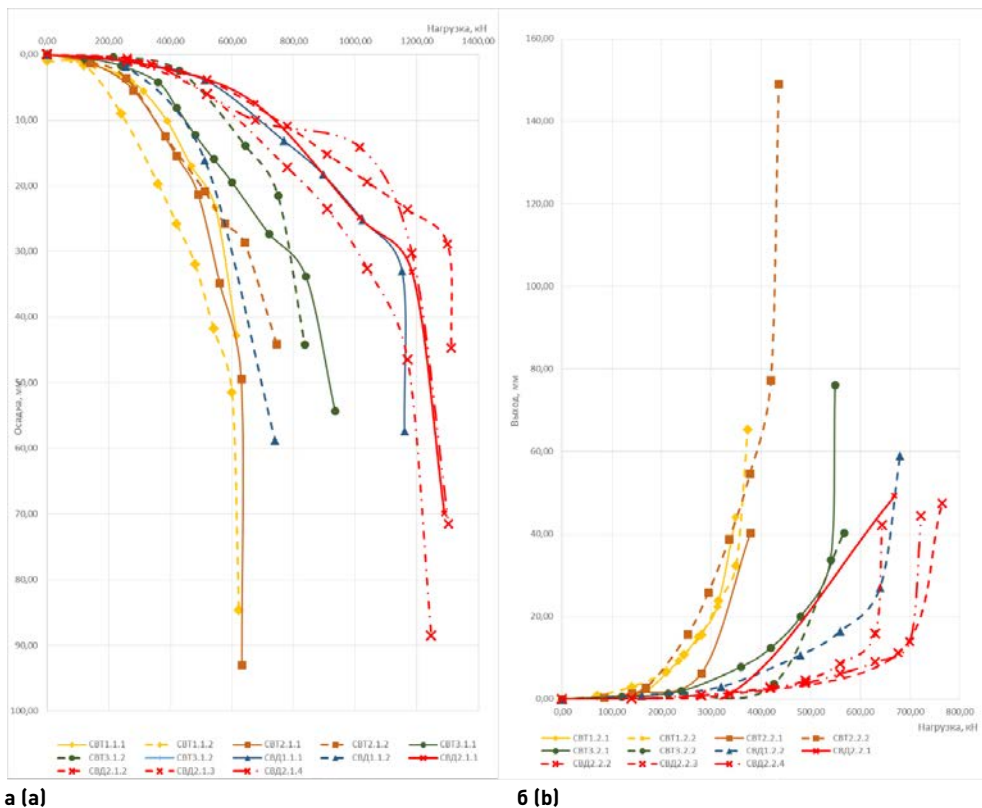


Рис. 2. Результаты полевых испытаний: а – на вдавливающую нагрузку; б – на выдергивающую нагрузку
Fig. 2. Field test results: a – pressing load; b – pulling load

– при увеличении глубины заложения первой лопасти от поверхности в 2,6 раза и типоразмера трехлопастной винтовой сваи в 1,4 раза (диаметра лопасти, вала, расстояния между первой и третьей лопастями), но при этом шаг лопастей S кратен $3D$, несущая способность на действие выдергивающей нагрузки увеличивается в 2,3 раза.

Увеличение числа лопастей с 2 до 3 в данном исследовании не привело к большому увеличению несущей способности. Рациональным конструктивным решением в песчаных грунтах, сложенных песком средней крупности, является применение винтовых металлических двухлопастных свай.

При этом стоит обратить внимание на результаты испытаний на выдергивающую нагрузку трехлопастных винтовых свай СВТ3.2 и двухлопастных винтовых свай СВД2.2. Глубина заложения до первой лопасти у данных свай составляет $2D-3,6D$. В работах [4, 5, 14] такие винтовые однолопастные сваи классифицировались как анкера мелкого заложения, т. е. с глубиной заложения менее $6D$, потеря их устойчивости происходит в результате образования конуса выпирания и выхода его на поверхность грунта. Угол наклона граней конуса выпирания к вертикали по экспериментальным данным в работах [4, 14] равен углу внутреннего трения грунта. Поэтому определение за частное предельное значение несущей способности для данных многолопастной винтовой сваи, воспринимающих выдергивающую нагрузку, значение нагрузки, под воздействием которого свая получит выход, равный $0,05D$, где D – диаметр лопасти, возможно, является некорректным. Однако в работе [4] указывалось, что данный критерий ($6D$) является лишь приближенной оценкой, сильно зависит от геометрических соотношений винтовой сваи и характеристик грунта и для многолопастных свай может быть меньше.

Определение характера взаимодействия и численных значений несущей способности свай при различных осадках выполнялось при помощи математического моделирования напряженно-деформированного состояния грунтового массива с использованием метода конечных элементов, реализованного в программном комплексе Plaxis 2D. Для грунтового массива использовалась упругопластическая модель грунта Мора – Кулона, а для моделирования свай – линейная модель.

При расчете одиночной многолопастной винтовой сваи (моделировании испытания на статическую нагрузку) глубина расчетной области превышала отметку острия сваи не менее десяти диаметров нижней лопасти D и не менее половины длины сваи L . Радиус расчетной области при этом составлял не менее одной длины сваи L и не менее четырех диаметров нижней лопасти D .

Концентрацию предельного сопротивления (сдвиговых деформаций) и пластическое течение грунта по контакту «многолопастная винтовая свая – грунт» описывали путем использования специальных «интерфейсных» (контактных) элементов, а в примыкающих к винтовым лопастям зонах грунта – дополнительно посредством надлежащего сгущения сетки конечных элементов.

Изополя перемещений двух- и трехлопастных винтовых свай СВД2 и СВТ3 с глубиной заложения первой лопасти менее $6D$ представлены на рис. 3.

При действии вдавливающей нагрузки не формируется сдвиг по цилиндрической поверхности, заключенной между лопастями, каждая лопасть работает отдельно. Аналогичная ситуация при действии выдергивающей нагрузки, однако, как было отмечено в работах [4, 14], над первой лопастью формируется «конус выпирания».

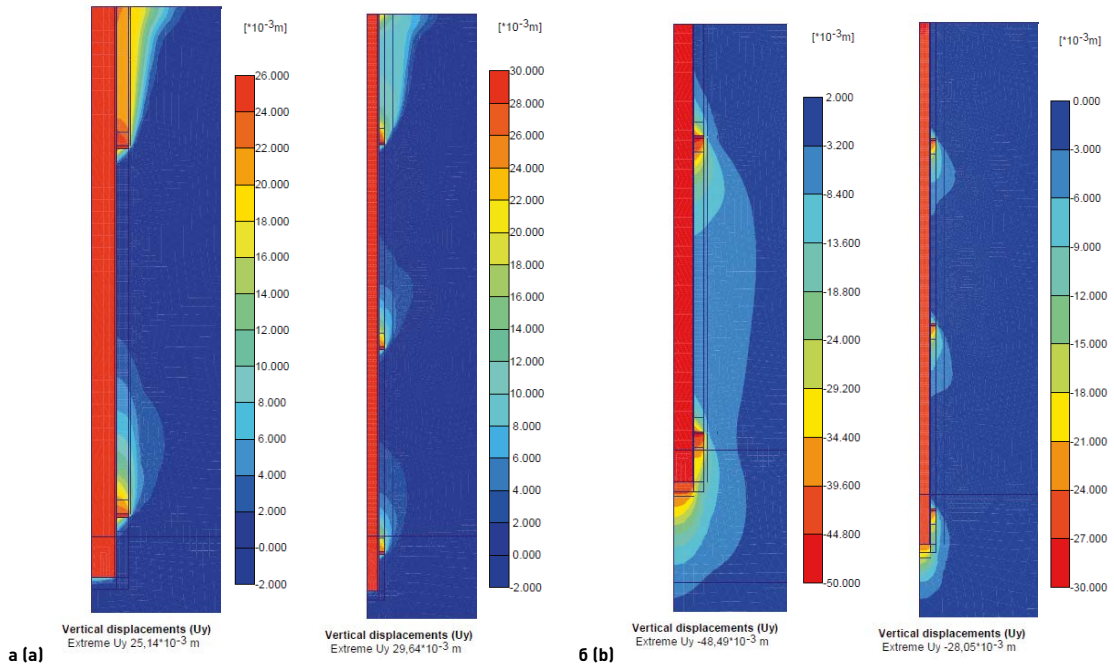


Рис. 3. Вертикальные перемещения СВД2 и СВТ3 при действии: *а* – вдавливающей нагрузки; *б* – выдергивающей нагрузки

Fig. 3. Vertical displacements of SVD2 and SVT3 screw piles under the action of: *a* – pressing load; *b* – pulling load

Результаты численного моделирования и полевых испытаний представлены в табл. 3 и на рис. 4. Результаты определения частного значения несущей способности, установленного численным методом для трехлопастных свай, отличаются от результатов полевых испытаний не более чем на 15–30 %, при этом для двухлопастных свай при действии выдергивающей нагрузки данный показатель варьируется в пределах 6–10 %, а при действии вдавливающей нагрузки разница между результатами численного моделирования и полевого эксперимента возрастает на 30–60 %. Такая разница может быть обоснована тем, что при погружении указанных свай сначала не была достигнута проектная отметка, не хватило мощности гидромотора, поэтому для достижения проектной отметки выполняли попеременное выкручивание и закручивание свай. При численном моделировании не учитывалось разрыхление грунтов под последней лопастью, поэтому были получены завышенные результаты.

Заключение

По экспериментальным исследованиям работы многолопастных винтовых свай с соотношением между диаметром ствола и диаметром лопасти d/D , равным 0,63–0,66, в песчаном грунтовом основании рациональным конструктивным решением для песчаных грунтов является применение винтовых металлических двухлопастных свай.

Полученные по итогам численных расчетов значения несущей способности многолопастной винтовой сваи в основном находятся в пределах допустимого отклонения, обеспечивая

запас до 30 %. Однако необходимо учитывать разрыхление грунтов при прорезке его лопастями или при нарушении технологии их устройства, неучет данного фактора приводит к увеличению расхождения результатов численного моделирования и полевых экспериментов более чем на 30 %.

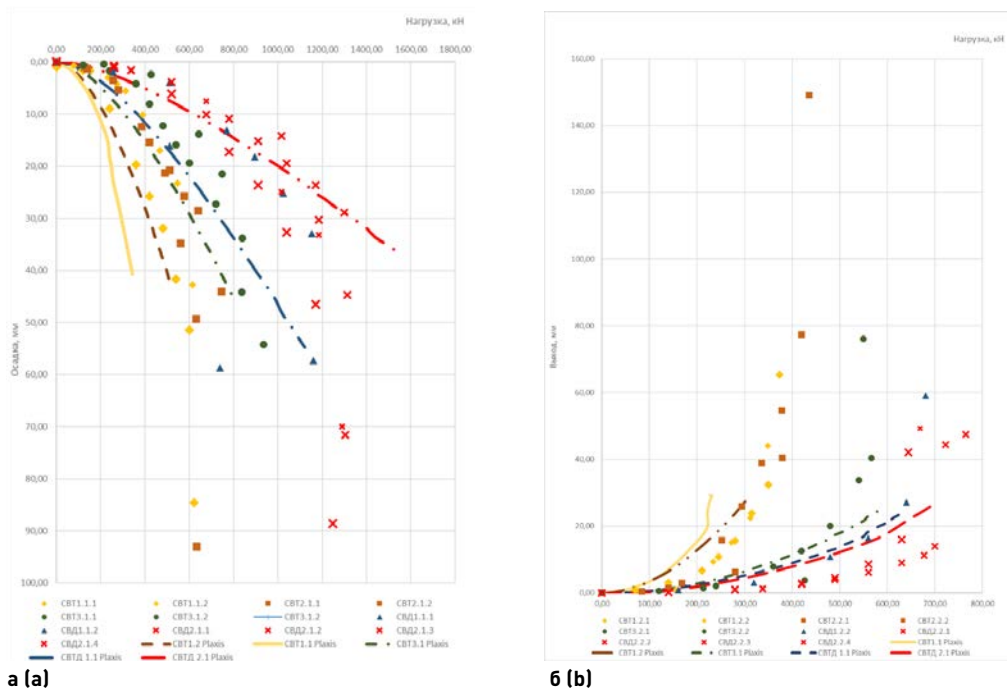


Рис. 4. Результаты численного моделирования многолопастных винтовых свай: *а* – на вдавливающую нагрузку; *б* – на выдергивающую нагрузку
Fig. 4. Numerical simulation of multi-blade screw piles: *a* – pressing load; *b* – pulling load

Таблица 3

Сравнение значений несущей способности многолопастных винтовых свай, полученных по результатам полевых испытаний, и результатов численного моделирования

Table 3

Test bearing capacity of multi-blade screw piles vs numerical simulation results

Типораз- мер	Вдавливание				Выдергивание			
	<i>s</i> = 40 мм	<i>s</i> = 0,1 <i>D</i>	Plaxis 40 мм	Plaxis 0,1 <i>D</i> мм	<i>s</i> = 25 мм	<i>s</i> = 0,05 <i>D</i>	Plaxis 25 мм	Plaxis 0,05 <i>D</i> мм
CBT1	529	297	341	225	316	213	223	137
CBT2	585	450	497	305	290	208	287	167
CBT3	869	670	736	529	502	414	588	408
СВД1	640	602	899	787	568	499	638	548
СВД2	1109	1175	1648	1926	635	635	681	675

Список литературы

1. Алексеев А.Г., Безволев С.Г., Сазонов П.М., Звездов А.А. О необходимости исследований работы винтовых свай и актуализации норм проектирования свайно-винтовых фундаментов. Промышленное и гражданское строительство. 2018;(1):43–47.
2. СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. Актуализированная редакция СНиП 2.02.03-85 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/728474148>
3. Алексеев А.Г., Безволев С.Г., Сазонов П.М. Опыт применения многолопастных винтовых свай в пылеватом-глинистом грунтовом основании. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2018;(6):14–20.
4. Трофименков Ю.Г., Мариупольский Л.Г. Винтовые сваи в качестве фундаментов мачт и башен линий передач. Основания, фундаменты и механика грунтов. 1964;(4):15–19.
5. Железков В.Н. Винтовые сваи в энергетической и других отраслях строительства. Санкт-Петербург: Прагма; 2004.
6. Алексеев А.Г., Звездов А.А. Разработка теоретических принципов и правил расчета многолопастных винтовых свай в условиях многолетнемерзлых грунтов. Вестник НИЦ «Строительство». 2018;17(2):23–34.
7. Свидерских А.В., Алексеев А.Г., Коровин Д.В. Эффективность устройства спиральных винтовых свай «Свайбер» в пучинистых грунтах. Промышленное и гражданское строительство. 2023;(7):85–90. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.07.85-90>
8. Alekseev A., Sazonov P., Zorin D., Vinogradova S. Application of pile foundations in structurally unstable soils. MATEC Web of Conferences. 2019;265:05020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926505020>
9. Алексеев А.Г., Безволев С.Г. Адаптация к требованиям инженерной практики методики расчета винтовых свай с применением ПК PLAXIS. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2020;(1):23–28.
10. Акопян В.Ф. Моделирование совместной работы винтовых свай с нелинейнодеформируемым грунтовым основанием [автореф. дис.]. Ростов-на-Дону; 2012.
11. Полищук А.И., Максимов Ф.А. Совершенствование конструкции винтовых свай для фундаментов временных зданий. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016;(4):37–40.
12. Полищук А.И., Максимов Ф.А. Инженерный метод расчета осадки винтовой двухлопастной сваи в глинистом грунте. Основания, фундаменты и механика грунтов. 2017;(6):9–14.
13. ГОСТ 5686–2020. Грунты. Методы полевого испытания сваями. Москва: Стандартинформ; 2014.
14. Аль-Тамими Саиф Сами Хуссейн. Несущая способность и устойчивость песчаных оснований коротких винтовых металлических свай при действии вдавливающей и выдергивающей нагрузок [автореф. дис.]. Минск; 2017.

References

1. Alekseev A.G., Bezvolev S.G., Sazonov P.M., Zvezdov A.A. On the need to study the operation of screw piles and update the design standards for pile-screw foundations. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2018;(1):43–47. (In Russian).
2. SP 24.13330.2021. Pile foundations. Updated version of SNiP 2.02.03-85. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/728474148>. (In Russian).
3. Alekseev A.G., Bezvolev S.G., Sazonov P.M. Experience of using multi-blade screw piles in silt-loam soil foundation. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2019;55(6):387–393. <https://doi.org/10.1007/s11204-019-09553-2>
4. Trofimenkov Yu.G., Mariupolsky L.G. Screw piles as foundations for masts and towers of transmission lines. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 1964;(4):15–19. (In Russian).
5. Zhelezkov V.N. Screw piles in the energy and other sectors of construction. Saint Petersburg: Pragma Publ.; 2004. (In Russian).
6. Alekseev A.G., Zvezdov A.A. The development of theoretical principles and rules for calculating multi-blade screw piles under conditions of permafrost soils. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2018;17(2):23–34. (In Russian).
7. Sviderskikh A.V., Alekseev A.G., Korovin D.V. The efficiency of the installation of spiral screw piles "Svayber" in heaving soils. Promyshlennoe i Grazhdanskoe Stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2023;(7):85–90. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.07.85-90>

8. *Alekseev A., Sazonov P., Zorin D., Vinogradova S.* Application of pile foundations in structurally unstable soils. MATEC Web of Conferences. 2019;265:05020. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201926505020>
9. *Alekseev A.G., Bezvoley S.G.* In-situ customization of the helical pile design procedure using Plaxis 2D. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2020;57(1):77–83. <https://doi.org/10.1007/s11204-020-09640-9>
10. *Akopyan V.F.* Modeling the joint operation of screw piles with a nonlinearly deformable soil foundation [abstract. Diss.]. Rostov-on-Don; 2012. (In Russian).
11. *Polishchuk A.I., Maksimov F.A.* Improving the design of screw piles for temporary building foundations. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2016;53(4):282–285. <https://doi.org/10.1007/s11204-016-9399-z>
12. *Polishchuk A.I., Maksimov F.A.* Engineering method of calculating the settlement of two-bladed screw pile in clayey soil. Soil Mechanics and Foundation Engineering. 2018;54(6):377–383. <https://doi.org/10.1007/s11204-018-9484-6>
13. State Standard 5686-2020. Soils. Field test methods by piles. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
14. *Al-Tamimi Saif Sami Hussein.* Bearing capacity and stability of sandy foundations of short screw metal piles under the action of pressing and pulling loads [abstract. dis.]. Minsk; 2017. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Григорьевич Алексеев, д-р техн. наук, доцент, руководитель центра геокриологических и геотехнических исследований, НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство»; заместитель генерального директора по научной работе, АО «НИЦ «Строительство»; профессор кафедры механики грунтов и геотехники, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: adr-alekseev@ya.ru

тел.: +7 (926) 129-71-01

Andrey G. Alekseev, Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction; Deputy Director General for Research, JSC Research Center of Construction; Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

e-mail: adr-alekseev@ya.ru

tel.: +7 (926) 129-71-01

Светлана Александровна Виноградова✉, младший научный сотрудник лаборатории механики мерзлых грунтов и расчета оснований № 8 центра геокриологических и геотехнических исследований, НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство»; аспирант кафедры механики грунтов и геотехники, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: lane_vinogradovaa@list.ru

тел.: +7 (926) 635-60-14

Svetlana A. Vinogradova✉, Junior Researcher, Laboratory of Frozen Soil Mechanics and Calculation of Foundations No. 8, Center for Geocryological and Geotechnical Research, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction; Graduate Student, Department of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

e-mail: lane_vinogradovaa@list.ru

tel.: +7 (926) 635-60-14

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-113-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-113-130)

EDN: RLARJU

УДК 550.34

ОБ УЧЕТЕ НЕРОВНОСТЕЙ ПОДЗЕМНОГО РЕЛЬЕФА ПРИ СЕЙСМИЧЕСКОМ МИКРОРАЙОНИРОВАНИИ СОСРЕДОТОЧЕННОГО ОБЪЕКТА

А.С. АЛЕШИН✉, д-р физ.-мат. наук

В.В. ПОГРЕБЧЕНКО

С.Н. НИКИТИН

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН (ИФЗ РАН), Большая Грузинская ул., д. 10, стр. 1, г. Москва, 123242, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Несогласное залегание слоев в верхней части геологического разреза широко распространено в практике сейсмического микрорайонирования (СМР). Это делает сомнительным использование ряда популярных компьютерных программ интерпретации влияния грунтового массива на сейсмическое волновое поле. Использование усложненных программ обработки, например метода конечных элементов, в практике СМР сосредоточенных объектов зачастую нерентабельно.

Цель. Разработка простых методических приемов, позволяющих получать приемлемые по точности и трудозатратам решения задач СМР с учетом неровностей подземного рельефа.

Материалы и методы. В работе представлены результаты сейсмического микрорайонирования на площадке строительства сосредоточенного объекта повышенной ответственности в г. Хабаровске. Основным методическим приемом, использованным в статье, является представление грунтовых условий рядом моделей, образованных на основе данных по скважинам. Для определения спектров реакции и коэффициентов динамичности каждой модели было использовано компьютерное моделирование волновых полей. По методу прямой задачи СМР рассчитывались приращения сейсмической интенсивности.

Результаты. Для каждой модели получены графики спектров реакции и коэффициентов динамичности, по которым рассчитаны приращения и значения суммарной сейсмической интенсивности. Эти значения определяют границы, в которых находятся точные значения сейсмической интенсивности, учитывающие неровности подземного рельефа.

Выводы. Описана методика и представлены результаты СМР при изысканиях под строительство сосредоточенного объекта, учитывающего неровности подземного рельефа.

Ключевые слова: сейсмическое микрорайонирование, сосредоточенный объект, плоскопараллельные слои, модель грунтовой толщи, подземный рельеф, компьютерная обработка, спектр реакции, коэффициент динамичности, сейсмическая интенсивность

Для цитирования: Аleshин А.С., Погребченко В.В., Никитин С.Н. Об учете неровностей подземного рельефа при сейсмическом микрорайонировании сосредоточенного объекта. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):113–130. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-113-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-113-130)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.02.2025

Поступила после рецензирования 10.04.2025

Принята к публикации 17.04.2025

SUBSURFACE CONTOUR UNEVENNESS IN SEISMIC MICROZONING OF A POINT FACILITY

A.S. ALESHIN✉, Dr. Sci. (Phys. and Math.)

V.V. POGREBCHENKO

S.N. NIKITIN

Schmidt Institute of Physics of The Earth, Russian Academy of Sciences, Bolshaya Gruzinskaya str., 10, bld. 1, Moscow, 123242, Russian Federation

Abstract

Introduction. Unconformable bedding of layers in the upper part of a geological section is widely applied in seismic microzoning (SMZ) practice. This challenges the use of some popular software for interpreting the effect of soil massif on the seismic wave field. The use of complex processing software, such as the finite element method, often appears unprofitable in the practice of SMZ for point facilities.

Aim. To develop simple techniques for obtaining solutions acceptable in terms of accuracy and labor costs for SMZ tasks including the unevenness of the subsurface contour.

Materials and methods. The paper considers the results of SMZ at the construction site of an extra critical point facility in Khabarovsk, Russian Federation. The main methodological approach of this study represents soil conditions by a series of models formed based on well data. We use computer simulation of wave fields to determine the response spectra and dynamic coefficients of each model. Seismic intensity increments are calculated using the direct SMZ method.

Results. Response spectra and dynamic coefficients obtained for each model were used to calculate increments and values of total seismic intensity. These values take into account the subsurface contour unevenness to define the boundaries of exact seismic intensity values.

Conclusions. The described methodology is supplemented with the results of SMZ during surveys for the construction of a point facility, taking into account the subsurface contour unevenness.

Keywords: seismic microzoning, point facility, plane-parallel layers, soil strata model, subsurface contour, computer processing, response spectrum, dynamic coefficient, seismic intensity

For citation: Aleshin A.S., Pogrebchenko V.V., Nikitin S.N. Subsurface contour unevenness in seismic microzoning of a point facility. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):113–130. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-113-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-113-130)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.02.2025

Revised 10.04.2025

Accepted 17.04.2025

Введение

Несогласное залегание слоев в верхней части геологического разреза – явление широко распространенное и давно замеченное в практике сейсмического микрорайонирования (СМР). Факторы, влияющие на формы рельефа подземных границ, принято делить как на эндогенные, протекающие внутри Земли, так и на экзогенные – внешние по отношению к грунтовому массиву и проявляющиеся через влияние внешних оболочек, окружающих твердую Землю. Другими словами, рельеф, в том числе и подземный, является результатом совместного действия эндогенных и экзогенных процессов. Для СМР вопросы учета влияния неровностей рельефа на сейсмическое волновое поле имеют важное значение, поскольку наиболее популярные компьютерные программы основаны на двух предположениях: плоскопараллельной модели грунтовых слоев и нормального падения сейсмических колебаний из нижнего полупространства. Справедливость второго предположения основана на том, что большинство землетрясений происходит на значительной глубине, где значения скоростей упругих волн значительно превышают соответствующие значения в грунтовых слоях. Это обстоятельство является причиной того, что угол выхода сейсмической радиации к дневной поверхности, в соответствии с законом Снеллиуса, близок к нулю. В отношении предположения о плоскопараллельной модели грунтовой толщи такая определенность зачастую отсутствует, что делает сомнительным использование вышеупомянутых программ для правильной интерпретации влияния грунтового массива на соответствующее волновое поле. Как быть в таком случае? Конечно, идеальным было бы использовать усложненные программы обработки, адекватные реальной геологической обстановке, например с использованием метода конечных элементов. Но, во-первых, такие программы в практике СМР используются крайне редко, во-вторых, использование сложных и трудоемких программ обработки для решения частных вопросов СМР зачастую нерентабельно. Сказанное обуславливает поиск простых методических приемов, позволяющих получать приемлемые по точности и трудозатратам решения задач СМР с использованием предположений о плоскопараллельности границ грунтовой толщи. Описанию одной из возможных методик учета неровностей подземного рельефа посвящена данная работа.

Сведения об объекте строительства

В статье представлены результаты сейсмического микрорайонирования на площадке строительства сосредоточенного объекта повышенной ответственности в г. Хабаровске. Исходная сейсмичность определялась по картам ОСР-2015-В. Выбор уровня карты ОСР был обусловлен ответственностью объекта согласно требованиям нормативных документов. Схема расположения объекта изысканий в районе г. Хабаровска приведена на рис. 1, из которого следует, что здание расположено на берегу р. Амур. В отношении назначения и ответственности объект относится к объектам, перечисленным в п. 2 табл. 3 нормативного документа [1]. Горизонтальные размеры площадки строительства составляют примерно 150 м, что позволяет классифицировать ее с точки зрения СМР как сосредоточенный объект [2]. Фундамент здания заглублен на 1,8 м от уровня дневной поверхности.

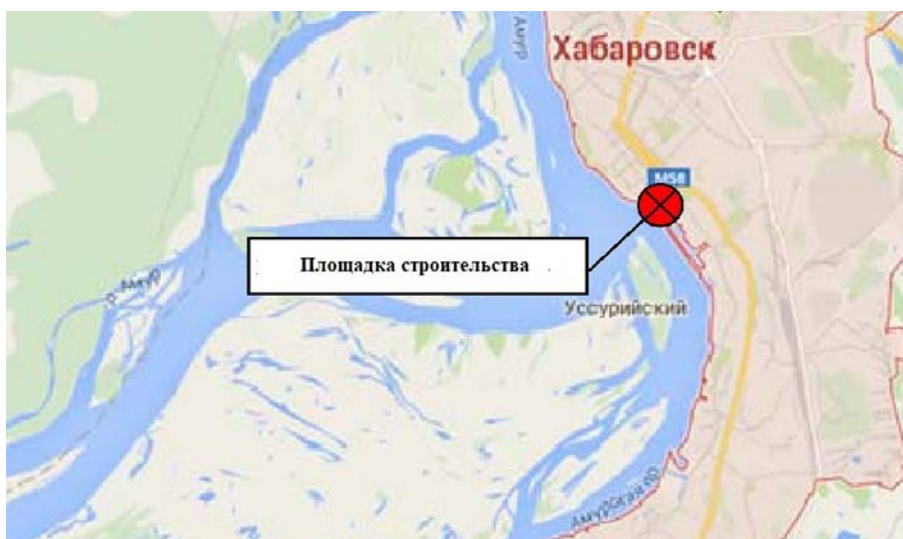


Рис. 1. Схема расположения объекта изысканий на карте
Fig. 1. Location of the survey object

Параметры исходной сейсмичности

В соответствии с требованиями нормативных документов объект изысканий в г. Хабаровске относится к повышенному (I) уровню ответственности. Это означает, что сейсмичность территории, на которой предполагается расположить это здание, следует оценивать по карте общего сейсмического районирования ОСР-2015-В. Фрагмент карты ОСР-2015-В территории расположения площадки изысканий приведен на рис. 2.

На рис. 3 по вертикальной оси отложены значения сейсмической интенсивности, а по горизонтальной – логарифм значений соответствующего периода повторяемости T . Жирная прямая линия показывает соответствующий график прямой наименьших квадратов отклонений от заданных значений интенсивности. В виде формулы эта зависимость выражается как $\Delta I = 1,513 \lg T + 1,6789$. При подстановке $T = 1000$ лет (уровень ответственности B) с округлением до 0,1 балла получим значение в баллах $\Delta I = 6,2$. Это значение интенсивности, относящееся к средним грунтам 2-й категории, принимаем за исходную сейсмическую интенсивность площадки изысканий.

Общие замечания относительно методики СМР

Определение приращений сейсмической интенсивности на площадке строительства объекта повышенной ответственности в данной работе основано на положениях нормативного документа СП 283.1325800.2016 [2]. В работе [3] изложен новый метод сейсмической микрорайонирования – метод решения прямой задачи СМР (МПЗ).

1. В основе метода МПЗ лежит формирование на основе комплексных инженерно-геологических и геофизических исследований моделей грунтовой толщи. Глубина буровых выработок на площадке строительства должна быть равна мощности грунтов до кровли скальных пород с сейсмической жесткостью порядка $2000 \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$, но не более 30 м.

2. Для сосредоточенных объектов, подобных объекту в районе Хабаровска, формируется модель в соответствии с обобщением инженерно-геологических условий, где каждому

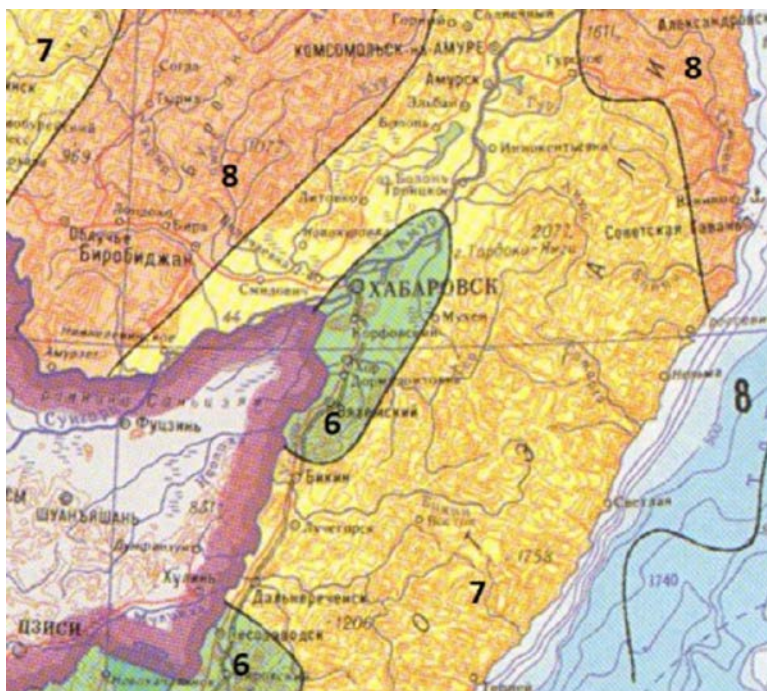


Рис. 2. Фрагмент карты ОСР-2015-В района изысканий

Fig. 2. GSZ-2015-V map of the survey area

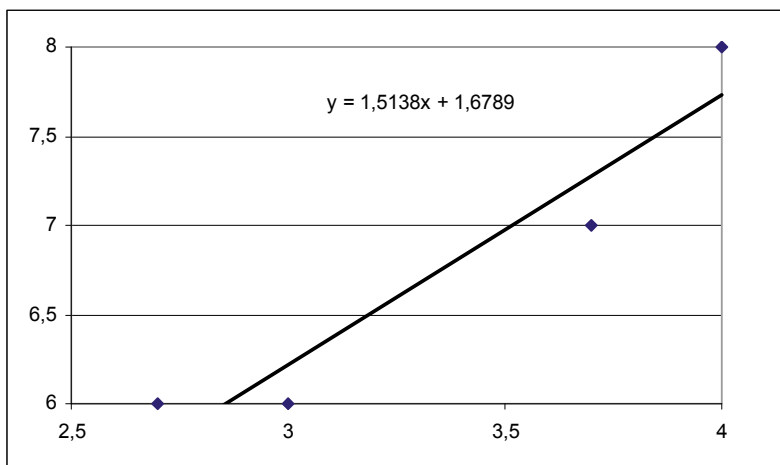


Рис. 3. Уточнение сейсмической интенсивности площадки изысканий по данным ОСР

Fig. 3. Refinement of seismic intensity at the survey site using GSZ data

инженерно-геологическому элементу сопоставлено в соответствие значение плотности и скорости поперечных волн. Последняя величина определяется на основании комплексирования данных инженерно-геологических и геофизических, главным образом сейсморазведочных, исследований.

3. В работе [4] предложена оригинальная техника компьютерного моделирования, основанная на использовании в качестве исходного сейсмического воздействия короткого импульса ускорений.

4. С использованием техники компьютерного моделирования производятся расчеты спектральных характеристик модели грунтовой толщи. Основной характеристикой, определяющей частотные свойства грунтового массива, является коэффициент динамичности.

5. Предложена новая формула расчета приращения сейсмической интенсивности, учитывающая все факторы влияния свойств грунтов на параметры сейсмических воздействий – сейсмическую жесткость, обводненность, резонансные эффекты и нелинейность реакции грунтов на сильные сейсмические воздействия.

По полученным данным определяются параметры сейсмических воздействий, отвечающие свойствам модели грунтовой толщи, рассчитываются приращения сейсмической интенсивности и суммарная сейсмическая интенсивность.

Расчетная мощность грунтового массива была определена в соответствии с нормативными требованиями: глубиной от дневной поверхности до грунта, с сейсмической жесткостью не менее $2000 \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Интенсивность исходных сейсмических воздействий относится к референтным грунтам с сейсмической жесткостью не менее $R = 2000 \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В случае, когда интенсивность сейсмических воздействий выражается в баллах, значения исходной сейсмичности берутся по карте ОСР с уменьшением на 1 балл.

Расчет приращения сейсмической интенсивности производится по формуле:

$$\Delta I = 3,3 \lg (bR_0 / (R_1 + R_0)),$$

где R – сейсмическая жесткость грунта;

индексы 0 и 1 показывают отношение их к референтному (в данном случае скальному) или исследуемому грунту;

b – максимум коэффициента динамичности.

Коэффициент 3,3 вместо 2,5, который приведен в нормах [2], использован, поскольку все расчеты по СМР, согласно документу [5], должны производиться в шкале MSK-64 в соответствии с данными по карте ОСР.

В состав работ, относящихся к СМР на площадках строительства, согласно нормативу [2], обязательно входит несколько таблиц:

– таблица физико-механических свойств грунтов. В ней для каждого инженерно-геологического элемента приведены основные данные – плотность, скорость сдвиговых волн, модули деформации, сцепление, сопротивление сжатию и т. п.;

– таблица, в которой определены параметры сейсмических моделей: мощность слоев, значения плотности и скорости сдвиговых волн в этих слоях, а также приводится расчет приращений интенсивности и суммарной сейсмической интенсивности, в которой содержатся сведения об исходной и расчетной сейсмичности.

Инженерно-геологические условия и физико-механические свойства грунтов площадки изысканий

Для инженерных изысканий на площадке строительства было пробурено 14 скважин глубиной до 39 м. План расположения скважин на площадке приведен на рис. 4.

По предварительным результатам камеральной обработки полевых работ и лабораторных исследований грунтов на рассматриваемом участке в соответствии с требованиями

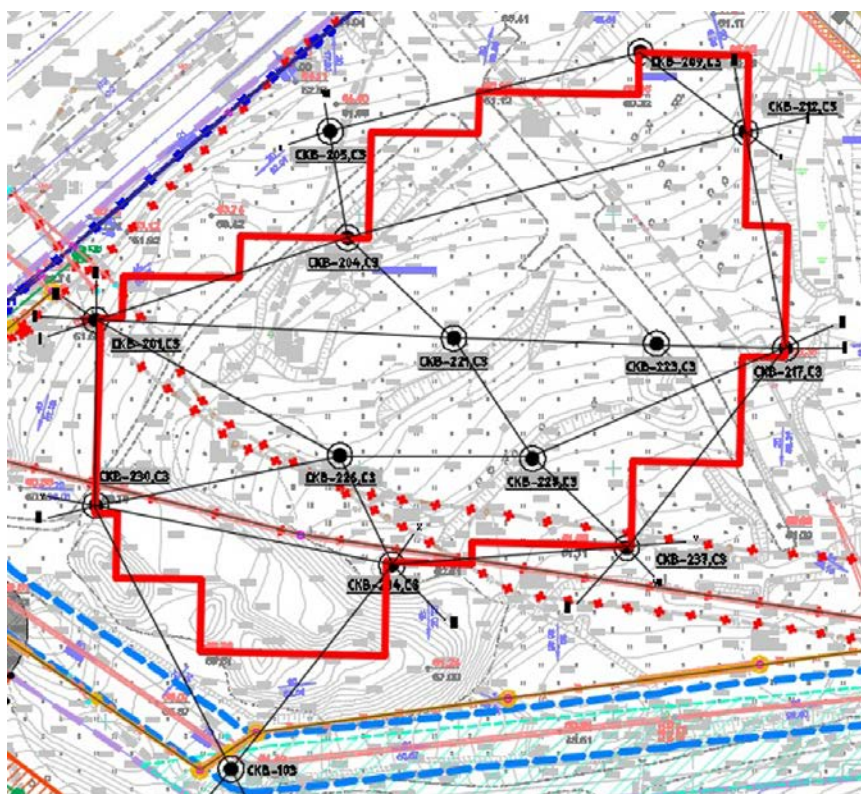


Рис. 4. Расположение скважин на площадке строительства

Fig. 4. Location of wells at the construction site

нормативных документов в разрезе на площадке изысканий выделено 13 инженерно-геологических элементов.

Основные физико-механические параметры грунта площадки изысканий, существенные для СМР, приведены в табл. 1. В соответствующем столбике дано краткое описание прослоя грунта, далее последовательно приводятся значения плотности ρ модуля общей деформации водонасыщенного грунта E , прочности на одноосное сжатие σ и скорости поперечных волн V_s . Скорость поперечных волн – важнейшая характеристика сейсмических свойств грунта. Обычно она определяется при сейсморазведочных работах.

В условиях слабой дифференциации свойств грунтового массива, частых переслаиваний, отсутствия резких сейсмических границ более надежные данные могут быть получены с использованием корреляционной связи параметров инженерно-геологических и сейсмических свойств каждого инженерно-геологического элемента [6].

Прямое сопоставление данных инженерной геологии с данными сейсморазведки показало, что сейсморазведочные данные дают более сглаженный усредненный скоростной разрез по сравнению с данными инженерно-геологического описания свойств грунтов. Это обстоятельство имеет место в случае малококонтрастных (как в данном случае) в сейсмическом отношении свойств рыхлой грунтовой толщи, представленной дисперсными грунтами.

Таблица 1

Физико-механические параметры грунта площадки изысканий

Table 1

Physical and mechanical parameters of soil at the survey site

№ ИГЭ	Название грунта	ρ , т/м ³	E , МПа	σ , МПа	V_s , м/с
1Н	Насыпной грунт	1,93	6,3	–	160
2	Глина твердая	1,91	24	–	310
3а	Глина твердая	2,00	18	–	265
4а	Суглинок	1,93	11	–	210
4б	Суглинок твердый	1,98	13	–	225
4в	Суглинок мягкопластичный	1,95	9	–	190
6а	Дресвяный грунт	2,02	22	–	295
7	Щебенистый грунт	2,06	26	–	320
8	Глинистый сланец малопрочный	2,28	–	6,9	700
9	Щебенистый грунт	2,04	24	–	305
10	Кремнисто-глинистый сланец прочный	2,50	–	62,4	1000
11	Дресвяный грунт	1,99	20	–	285
12	Алеврит низкой прочности	2,55	–	1,3	285

Ввиду вышесказанного, наряду с непосредственным определением значений скоростей поперечных волн по данным сейсморазведки, авторы оценивали значения скоростей V_s , используя связи деформационных и упругих характеристик грунтов. В работе [6] приводятся графики связи динамического модуля упругости и модуля деформации для дисперсных грунтов.

Для дисперсных грунтов эта связь с достаточной для целей СМР степенью точности может быть выражена соотношением $E = 20E_{\text{деф}}$, где $E_{\text{деф}}$ – модуль деформации, а E – динамический модуль упругости. Отсюда, используя выражение связи модуля упругости E и модуля сдвига G :

$$E = 2 (1 + \sigma) G,$$

где σ – коэффициент Пуассона.

Подставив $G = \rho V_s^2$, можно получить выражение для V_s :

$$V_s = \sqrt{\frac{10E_{\text{деф}}}{\rho(1+\sigma)}}.$$

Подставляя в это выражение значения $E_{\text{деф}}$ и ρ для соответствующих ИГЭ из табл. 1, можно получить значения V_s для каждого ИГЭ. Значения коэффициента Пуассона для дисперсных грунтов с большой степенью уверенности можно брать равными 0,3. Для скальных пород коэффициент Пуассона берется равным 0,25.

Следует также отметить, что в целом сравнение результатов расчетов свойств грунтового массива с использованием описанного способа оценки сейсмических свойств грунтов

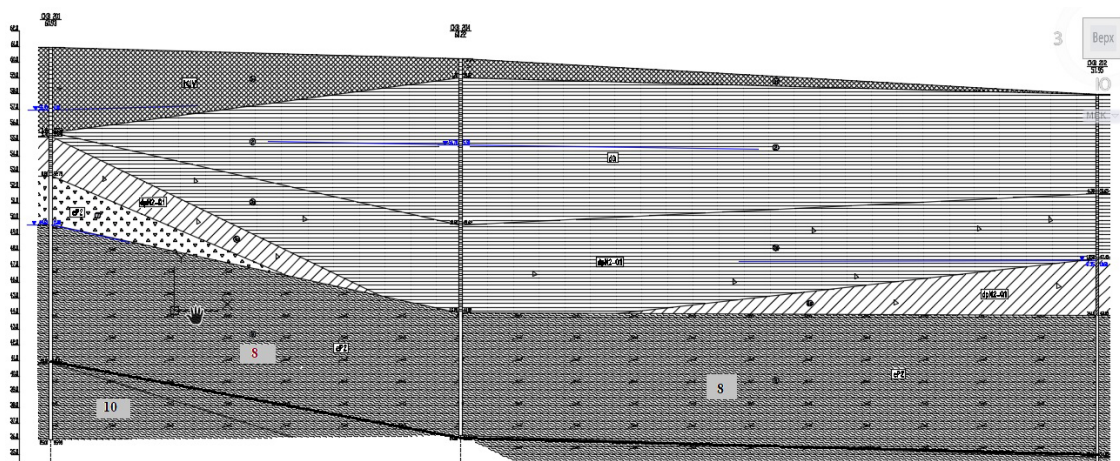


Рис. 5. Фрагмент инженерно-геологического разреза по линии II–II
 Fig. 5. Fragment of engineering geological section along line II–II

посредством инженерно-геологических параметров и непосредственных определений сейсморазведкой показывает достаточно удовлетворительное совпадение.

Значение скорости сдвиговых волн рыхлых грунтов было принято на основании сейсморазведочных определений и пересчета из значений модуля деформаций по штамповым испытаниям, а значение скорости V_s алевролитов вычислено из данных по прочности на сжатие с использованием соотношения: $V_s = \sqrt{\frac{160\sigma_{сж}}{\rho}}$, где $\sigma_{сж}$ – предел на одноосное сжатие. При этом если выразить $\sigma_{сж}$ в Па, а ρ в кг/м³, получим V_s в м/с. Отметим также, что в расчеты принималось значение $\sigma_{сж}$, относящееся к замоченным грунтам.

Перейдем к общей характеристике особенностей инженерно-геологического разреза на площадке изысканий. Анализ строения грунтовой толщи по скважинам показал, что всю совокупность скважин можно разделить на две группы. В одну можно отнести 9 скважин, которые вскрывают горизонт скальных пород ИГЭ 10, а в другую – 5 скважин, которые не вскрывают горизонт ИГЭ 10.

В качестве иллюстрации особенностей инженерно-геологического разреза по первой группе скважин на рис. 5 представлен разрез по линии II–II.

Как видим, граница раздела между слоями ИГЭ 8 и ИГЭ 10 выражена достаточно плавной линией, хотя в верхней части разреза отмечается чередование слабоконтрастных слоев и видны выклинивания различных слоев.

Разрез по линии IV–IV, представленный рис. 6, является иллюстрацией ситуации, когда высокоскоростной слой кремнистых сланцев ИГЭ 10 отсутствует. В целом картина примерно та же, что и на рис. 5: также заметны выклинивания слоев в верхней части разреза, но только отсутствует горизонт ИГЭ 10.

Согласно нормативному документу [2], если в 30-метровом массиве грунта отсутствует слой с сейсмической жесткостью более 2000 тм² с⁻¹, следует использовать гипотетический слой с упомянутыми параметрами на глубине, большей 30 м. Без ограничения общности предположим, что данный слой располагается на глубине 40 м. После этих пояснений можно перейти к описанию построения моделей грунта и расчету соответствующих частотных характеристик.

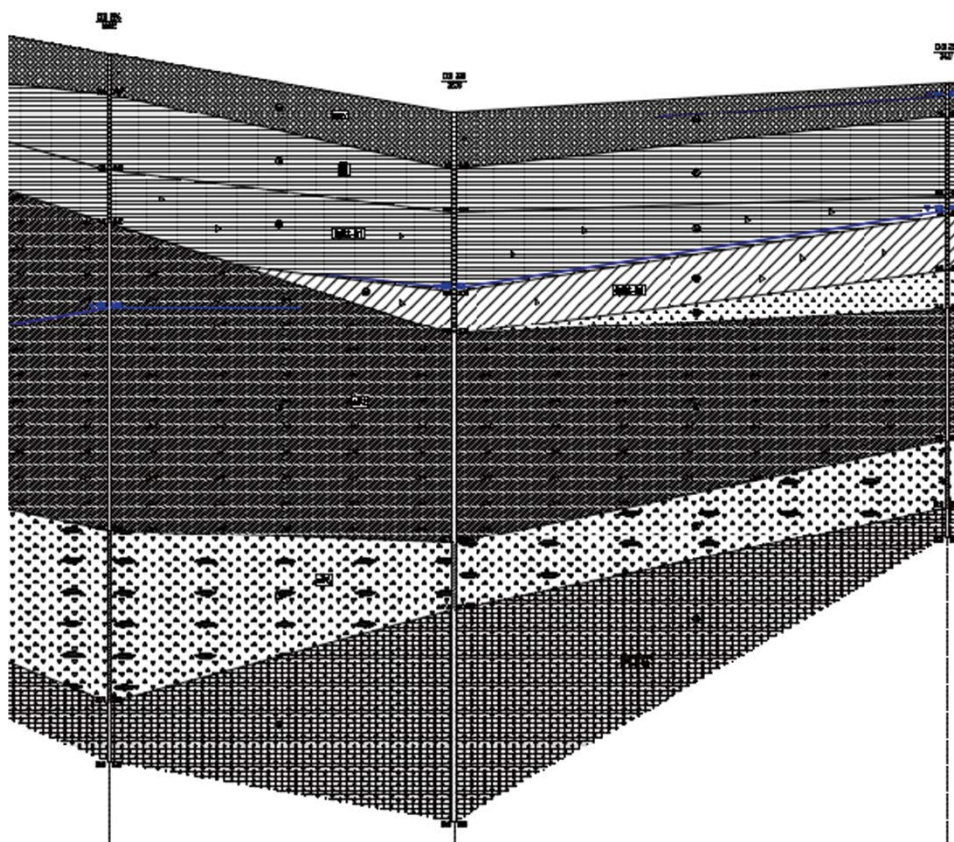


Рис. 6. Фрагмент инженерно-геологического разреза по линии IV–IV
Fig. 6. Fragment of engineering geological section along line IV–IV

Модели грунтовой толщи площадки строительства и их частотные характеристики

Как было сказано выше, вся совокупность скважин, описывающих инженерно-геологические свойства грунта на площадке строительства, была разделена на две группы в зависимости от того, выделяется в разрезе слой достаточно жестких грунтов ИГЭ 10 или нет.

Сначала рассмотрим модели первой группы с жестким слоем ИГЭ 10. Глубина кровли этого слоя колеблется в пределах от 2,5 м (скважина 103) до глубины 25,2 м (скважина 234). Инженерно-геологические данные были использованы для построения соответствующих моделей грунтовой толщи с ИГЭ 10, представленных в табл. 2.

Значения плотности и скорости поперечных волн каждого инженерно-геологического элемента брались из табл. 1. Параметры нижнего полупространства определялись свойствами ИГЭ 10.

Частотные характеристики рассчитывались с применением программы *NERA* [7]. Входное воздействие осуществлялось коротким импульсом амплитудой 0,05g, что соответствует 6-балльному сотрясению. Выходной характеристикой программы *NERA*, имеющей значение для расчетов приращений сейсмической интенсивности, является максимум спектра реакции при 5%-ном затухании, нормированного на значение при нулевом периоде, так называемом

Таблица 2

Параметры моделей грунтовой толщи с ИГЭ 10

Table 2

Parameters of soil stratum models with the EGE 10 layer

№ п/п	Наименование ИГЭ	Мощность, м	Плотность, т/м ³	Скорость, V _p , м/с
Скважина 103				
1	3а	2	2,00	265
2	4а	0,5	1,93	210
3	10	∞	2,50	1000
Скважина 201				
1	1Н	3,6	1,93	160
2	4а	2,8	1,93	210
3	7	3,1	2,06	320
4	8	8,7	2,28	700
5	10	∞	2,50	1000
Скважина 204				
1	2	8,8	1,91	310
2	3а	5,6	2,00	265
3	8	10,6	2,28	700
4	10	∞	2,50	1000
Скважина 205				
1	2	4,6	1,91	310
2	3а	4,3	2,00	265
3	4б	4	1,98	225
4	4а	0,9	1,93	210
5	6а	1,8	2,02	295
6	8	3,3	2,28	700
7	10	∞	2,50	1000
Скважина 209				
1	2	5,5	1,91	310
2	3а	4,2	2,00	265
3	4а	1,1	1,98	225
4	8	0,8	2,28	700
5	10	∞	2,50	1000
Скважина 212				
1	2	6,3	1,91	310
2	3а	4,2	2,00	265
3	4б	3,6	1,98	225
4	8	9	2,28	700
5	10	∞	2,50	1000
Скважина 221				
1	2	6,2	1,91	310
2	3а	2,2	2,00	265
3	4а	2,5	1,93	210
4	8	2,3	2,28	700
5	10	∞	2,50	1000

Таблица 2. Продолжение
Table 2. Continuation

№ п/п	Наименование ИГЭ	Мощность, м	Плотность, т/м³	Скорость, V _с , м/с
Скважина 230				
1	1Н	6,2	1,93	160
2	3а	2,2	2,00	265
3	4б	2,5	1,98	225
4	8	2,3	2,28	700
5	10	∞	2,50	1000
Скважина 234				
1	1Н	0,6	1,93	160
2	2	0,9	1,91	310
3	3а	0,7	2,00	265
4	4а	0,6	1,93	210
5	8	18,1	2,28	700
6	9	4,3	2,04	310
7	10	∞	2,50	1000

коэффициенте динамичности. Расчеты показали, что значение максимума коэффициента динамичности *b* изменяется в пределах от 1,9 (скважина 234) до 2,4 (скважины 201 и 212). Графики коэффициентов динамичности для моделей по скважинам 234 и 201 приведены на рис. 7 и 8. Максимум графика рис. 8 соответствует резонансу на толще грунтов между дневной поверхностью и кровлей слоя ИГЭ 8.

Теперь рассмотрим случай, когда в верхней части грунтового массива слой с повышенной сейсмической жесткостью не выделяется. Именно это имеет место для пяти скважин: 217, 223, 226, 228 и 237. В этом случае норматив [2] рекомендует расчетную мощность определять равной глубине расположения границы с сейсмической жесткостью не менее 2000 тм⁻² с⁻¹. Но как это сделать, не проводя бурения, в документе [2] не указано.

В книге [4] было экспериментально показано, что в случае постоянного значения сейсмической жесткости в массиве рыхлого грунта коэффициент динамичности практически не изменяется при увеличении мощности рыхлого массива. Но что будет в случае слоистости грунтового массива, на это упомянутый эксперимент не отвечает.

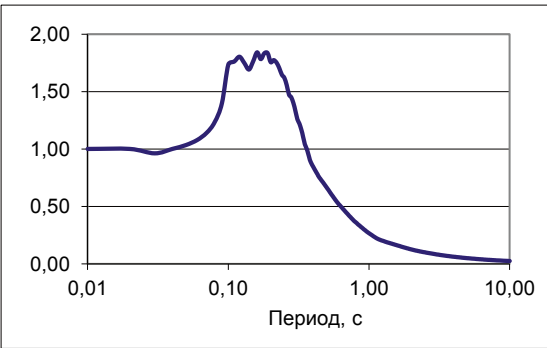


Рис. 7. Коэффициент динамичности, модель скважины 234

Fig. 7. Dynamic coefficient: well 234 model

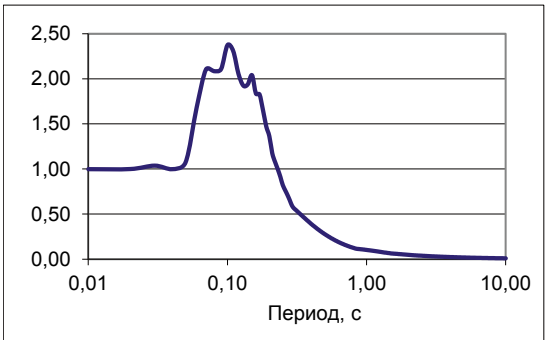


Рис. 8. Коэффициент динамичности, модель скважины 201

Fig. 8. Dynamic coefficient: well 201 model

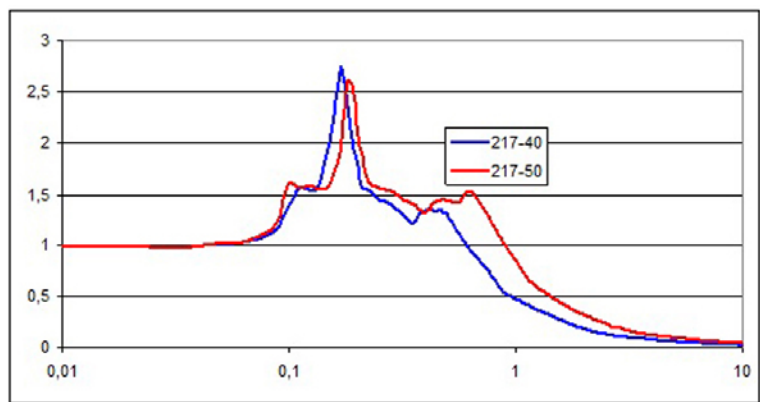


Рис. 9. Сравнение коэффициентов динамичности моделей 217–40 и 217–50
Fig. 9. Comparison of dynamic coefficients for 217–40 and 217–50 well models

Проверим на модельном примере, как глубина кровли скального полупространства влияет на частотные характеристики массива, т. е. на величину коэффициента b и соответствующий период. На рис. 9 приведены два графика коэффициентов динамичности – для моделей с глубиной кровли скалистого фундамента 40 и 50 м. При этом средние сейсмические жесткости в верхнем рыхлом слое близки. Коэффициенты динамичности и периоды двух моделей различаются весьма мало, причем меньшей глубине соответствует большая величина и более короткий период.

Параметры моделей грунта по скважинам без слоя ИГЭ 10 приведены в табл. 3. Для нижнего полупространства на глубине 40 м от дневной поверхности приняты значения $V_s = 800$ м/с, а плотности $\rho = 2,5$ т/м³.

Полученные значения коэффициента b для моделей без ИГЭ 10 находятся в пределах 2–2,7 (скважина 217). Можно отметить, что значения коэффициента b для этой группы моделей

Таблица 3

Параметры моделей без слоя ИГЭ 10

Table 3

Parameters of models without the EGE 10 layer

№ п/п	Наименование ИГЭ	Мощность, м	Плотность, т/м³	Скорость, V_s , м/с
Скважина 217				
1	2	5,4	1,91	310
2	3а	1,1	2,00	265
3	4а	3,0	1,93	210
4	6а	2,1	2,02	295
5	8	7,2	2,28	700
6	9	3,7	2,04	310
7	12	17,5	2,55	285
8		∞	2,50	800

Таблица 3. Продолжение
 Table 3. Continuation

№ п/п	Наименование ИГЭ	Мощность, м	Плотность, т/м³	Скорость, V_s , м/с
Скважина 223				
1	2	5,4	1,91	310
2	3а	2,4	2,00	265
3	4а	1,8	1,93	210
4	8	3,0	2,28	700
5	9	13,2	2,04	310
6	12	14,2	2,55	285
7		∞	2,50	800
Скважина 226				
1	2	4,3	1,91	310
2	3а	2,9	2,00	265
3	8	16,8	2,28	700
4	9	9,5	2,04	310
5	12	6,5	2,55	285
6		∞	2,50	800
Скважина 228				
1	1Н	1,3	1,93	160
2	2	2,4	1,91	310
3	3а	4,2	2,00	265
4	4а	2,4	1,93	210
5	8	11,5	2,28	700
6	9	3,7	2,04	310
7		∞	2,55	285
Скважина 237				
1	2	3,7	1,91	310
2	3а	0,8	2,00	265
3	4а	0,9	1,93	210
4	8	2,0	2,28	700
5	9	2,8	2,04	310
6	8	4,1	2,28	700
7	9	25,7	2,04	310
8		∞	2,50	800

в целом заметно выше соответствующих значений с более высоким положением кровли скального грунта. Лишь только для одной модели из пяти отмечено низкое значение $b = 2$. Графики коэффициентов динамичности для скважин 217 и 223 приведены на рис. 10 и 11.

Острый локальный пик на спектре реакции по скважине 217 показывает, что в этом случае имеет место резонанс в верхней части грунтового массива. Точнее всего частоту резонанса можно определить по спектру Фурье, приведенному на рис. 12.

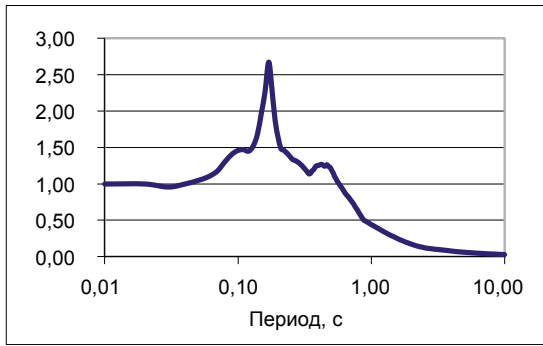


Рис. 10. Коэффициент динамичности, модель скважины 217

Fig. 10. Dynamic coefficient: well 217 model

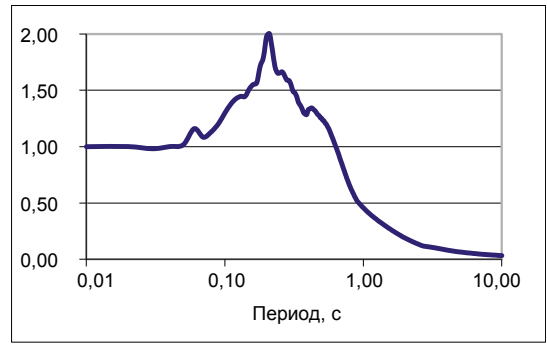


Рис. 11. Коэффициент динамичности, модель скважины 223

Fig. 11. Dynamic coefficient: well 223 model

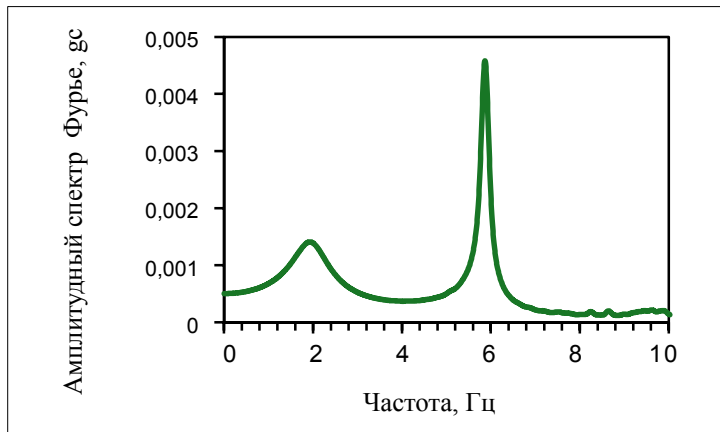


Рис. 12. Амплитудный спектр Фурье, скважина 217

Fig. 12. Fourier amplitude spectrum: well 217

Частота резонанса грунтового массива скважины 217, определенная по максимуму спектра Фурье $f = 5,87$ Гц, суммарная мощность рыхлых слоев $H = 11,6$ м. Отсюда по формуле $V = 4f \times H$, подставив значения H и f , можем получить значение скорости $V = 270$ м/с, что хорошо согласуется со значением средней скорости V_s для грунтового разреза скважины 217. Это, помимо прочего, подтверждает правильность выбора значений скорости V_s для каждого ИГЭ по данным инженерной геологии.

Таким образом, получены значения максимумов коэффициентов динамичности b всех моделей по скважинам на площадке строительства. Они находятся в пределах 1,9–2,7. Эти значения использовались в расчетах по определению приращения сейсмической интенсивности с учетом резонансных эффектов.

Сейсмическая интенсивность на площадке строительства

Для определения приращения сейсмической интенсивности за счет грунтовых условий была использована методика расчетов по формуле метода прямой задачи СМР.

Приращение балла при этом описывается формулой:

$$\Delta I = 3,3lgbR_0/(R_1+R_0),$$

где R – сейсмическая жесткость расчетной мощности грунта;
индексы 0 и 1 относятся соответственно к референтному и исследуемому грунту;
 b – максимум коэффициента динамичности.

Расчетная мощность грунта соответствует мощности до границы с $R > 2000 \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$ в случае ее наличия в верхней 30-метровой толще разреза. В противном случае такая граница гипотетически определялась на глубине 40 м. Средние значения плотности, скорости поперечных волн и сейсмической жесткости верхней рыхлой части массива грунта рассчитывались по формулам: $\rho_{\text{сред}} = \Sigma \rho_{ih_i} / \Sigma h_i$; $V_{\text{сред}} = \Sigma h_i / (\Sigma h_i / v_i)$; $R_{\text{сред}} = \rho_{\text{сред}} \times V_{\text{сред}}$.

Поскольку в качестве референтного грунта приняты грунты скального основания, значения исходной сейсмичности в соответствии с требованиями норматива [5] приняты на 1 балл ниже, чем приведенные выше, т. е. для сооружений повышенного уровня ответственности они оцениваются величиной 5,2 баллов. Приращения сейсмической интенсивности и суммарная сейсмическая интенсивность оценивались с точностью 0,1 балла.

Результаты расчетов приращений сейсмической интенсивности и суммарной сейсмической интенсивности на площадке строительства приведены в табл. 4.

Таблица 4

Расчеты суммарной интенсивности на площадке строительства

Table 4

Calculations of the total intensity at the construction site

Модель	$R_0, \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$	$R_1, \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$	b	ΔI	I_0	ΣI
103	2500	500	2,0	0,7	5,2	5,9
201	2500	668	2,4	0,9	5,2	6,1
204	2500	807	2,0	0,6	5,2	5,8
205	2500	597	2,0	0,7	5,2	5,9
209	2500	578	1,9	0,6	5,2	5,8
212	2500	739	2,4	0,9	5,2	6,1
221	2500	605	1,9	0,6	5,2	5,8
230	2500	994	2,1	0,6	5,2	5,8
234	2500	1069	1,9	0,4	5,2	5,6
217	2000	720	2,73	1,0	5,2	6,2
223	2000	672	2,0	0,6	5,2	5,8
226	2000	709	2,25	0,7	5,2	5,9
228	2000	742	2,7	1,0	5,2	6,2
237	2000	688	2,3	0,8	5,2	6,0

Заключение

В результате проведенных исследований получены следующие основные результаты:

1. Уточненная исходная сейсмичность района строительства сосредоточенного объекта повышенной ответственности в г. Хабаровске по карте ОСР-2015-В составляет 6,2 балла для «средних» грунтов 2-й категории. Интенсивность сейсмических воздействий, отнесенную к скальным грунтам 1-й категории, следует оценивать величиной 5,2 балла.

2. С использованием связи характеристик инженерно-геологических и сейсмических свойств грунтов определены сейсмические параметры (плотность и скорость поперечных волн) каждого инженерно-геологического элемента.

3. Анализ инженерно-геологической информации по участку изысканий показал сложное строение грунтовой толщи, наличие в ней частых выклиниваний, резких изменений мощности отдельных слоев и т. п. Эти факторы делают сомнительным применение стандартной методики расчетов с использованием программ, в основе которых лежит предположение о плоско-параллельности сейсмических границ.

4. Модели грунтовой толщи на площадке строительства были составлены на основе инженерно-геологических данных по 14 скважинам, пробуренным на глубину до 39 м. Для 9 скважин бурением был вскрыт горизонт по величине сейсмической жесткости, отождествленный с кровлей скального жесткого полупространства. По другим 5 скважинам к разрезу была добавлена мощность нижнего слоя грунта так, чтобы общая мощность грунтовой толщи составила 40 м. Эта толща рыхлого грунта располагалась на кровле скального полупространства с сейсмической жесткостью $2000 \text{ тм}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Таким образом, расчеты параметров сейсмического волнового поля велись по 14 моделям в предположении плоско-параллельности разреза по каждой скважине. Основная методическая особенность данной работы состоит в том, что оценка сейсмической интенсивности в реальной ситуации с учетом явлений дифракции на неоднородностях подземного рельефа будет находиться в пределах рассмотренных модельных представлений.

5. По полученным моделям грунта были рассчитаны спектральные характеристики, включая спектры Фурье, спектры реакции и коэффициенты динамичности.

6. Определены приращения сейсмической интенсивности, обусловленные свойствами верхней части грунтового массива. Величины их заключаются в пределах 0,4–1,0 балла по отношению к исходной интенсивности на скальном основании, т. е. к интенсивности 5,2 балла. Эти значения учитывают все факторы, влияющие на интенсивность сейсмических колебаний, включая резонансные эффекты.

7. Таким образом, суммарное (с учетом грунтовых условий) значение интенсивности от наиболее сильных землетрясений (отнесенных к периоду 1000 лет) на площадке строительства в г. Хабаровске с округлением до десятых долей балла не превышает 6,2 балла. Эта оценка является верхней границей возможной интенсивности на территории изысканий для периода повторения 1000 лет. Неучтенные неровности подземного рельефа могут только уменьшить эту оценку.

Надеемся, что описанная методика окажется востребованной при работах по сейсмическому микрорайонированию при изысканиях под строительство сосредоточенных объектов.

Список литературы

1. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*. Москва: Стандартинформ; 2018.
2. СП 283.1325800.2016. Объекты строительные повышенной ответственности. Правила сейсмического микрорайонирования. Москва: Минстрой России; 2016.
3. Аleshin A.C., Pogrebchenko V.V., Nikitin S.N. Решение прямой задачи как новый метод сейсмического микрорайонирования. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2021;(2):38–53. <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-2-38-53>
4. Аleshin A.C. Континуальная теория сейсмического микрорайонирования. Москва: Научный мир; 2017.
5. РСН 60-86. Инженерные изыскания для строительства. Сейсмическое микрорайонирование. Нормы производства работ. Москва: Стройиздат; 1986.
6. Горяинов Н.Н., ред. Применение сейсмоакустических методов в гидрогеологии и инженерной геологии. Москва: Недра; 1992.
7. Bardet J.P., Tobita T., Nera F. Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California; 2001.

References

1. SP 14.13330.2018. Seismic building design code. Updated version of SNiP II-7-81*. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
2. SP 283.1325800.2016. Highly critical construction projects. Rules of seismic microzonation. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2016. (In Russian).
3. Aleshin A.S., Pogrebchenko V.V., Nikitin S.N. Solving a direct problem as a new method of seismic microzonation. Earthquake engineering. Safety of structures. 2021;(2):38–53. (In Russian). <https://doi.org/10.37153/2618-9283-2021-2-38-53>
4. Aleshin A.S. Continuous theory of seismic microzoning. Moscow: Nauchnyi mir Publ.; 2017. (In Russian).
5. RSN 60-86. Engineering surveys for construction. Seismic microzoning. Standards for the production of works. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1986. (In Russian).
6. Goryainov N.N., ed. Application of seismoacoustic methods in hydrogeology and engineering geology. Moscow: Nedra Publ.; 1992. (In Russian).
7. Bardet J.P., Tobita T., Nera F. Computer Program for Nonlinear Earthquake Site Response Analyses of Layered Soil Deposits. University of Southern California; 2001.

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Степанович Алешин , д-р физ.-мат. наук, главный научный сотрудник лаборатории 701, ИФЗ РАН, Москва
e-mail: asa@ifz.ru

Alexander S. Aleshin , Dr. Sci. (Phys. and Math.), Chief Researcher, Laboratory 701, Schmidt Institute of Physics of The Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow
e-mail: asa@ifz.ru

Владимир Викторович Погребченко, старший научный сотрудник лаборатории 701, ИФЗ РАН, Москва
Vladimir V. Pogrebchenko, Senior Researcher, Laboratory 701, Schmidt Institute of Physics of The Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow

Сергей Николаевич Никитин, научный сотрудник лаборатории 701, ИФЗ РАН, Москва
Sergey N. Nikitin, Researcher, Laboratory 701, Schmidt Institute of Physics of The Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-131-147)
УДК 624.014

EDN: PUIQXJ

БЕЗОПАСНОСТЬ ОСНОВАНИЙ И ФУНДАМЕНТОВ ПРИ ПЕРЕХОДЕ НА ПАРАМЕТРИЧЕСКУЮ МОДЕЛЬ НОРМИРОВАНИЯ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

И.В. КОЛЫБИН✉, канд. техн. наук
Д.Е. РАЗВODOВСКИЙ, канд. техн. наук
А.В. СКОРИКОВ, канд. техн. наук

Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсегованова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. С сентября 2024 года строительная отрасль нашей страны начинала поэтапный переход от предписывающего метода нормирования к параметрическому подходу, основанному на установлении ключевых требований к объектам проектирования. Должен быть осуществлен пересмотр нормативной правовой базы, обеспечено развитие альтернативных способов и механизмов обоснования соответствия проектных значений и характеристик сооружения в целом и его оснований и фундаментов требованиям безопасности.

Цель. Рассмотреть мировой опыт параметрического нормирования в геотехнике, выделить ключевые проектные требования и проанализировать методы обеспечения безопасности проектных решений оснований и фундаментов.

Материалы и методы. Анализ выполнялся путем изучения положений отечественных и зарубежных нормативных и методических документов, выполнения сопоставительных расчетов тестовых примеров.

Результаты. Установлены ключевые требования к проектным решениям оснований и фундаментов, которые должны соблюдаться на безальтернативной основе при параметрическом методе нормирования.

Выводы. Перевод системы отечественных норм на параметрический метод проектирования в строительстве нуждается в переходном периоде. Требования соблюдения безопасности оснований и фундаментов в параметрической системе норм по-прежнему должны достигаться путем обеспечения критериев надежности при проверках оснований, конструкций и сооружений в целом по предельным состояниям, которые могут быть выполнены расчетным путем, испытаниями, моделированием. Все возрастающую роль при подтверждении соответствия проектных решений нормативным требованиям будут играть научные исследования, геотехнический мониторинг и наблюдательный метод, оценка геотехнических рисков.

Ключевые слова: параметрическое нормирование, основание, фундамент, геотехника, безопасность, ключевые параметры, надежность

Для цитирования: Колыбин И.В., Разводовский Д.Е., Скориков А.В. Безопасность оснований и фундаментов при переходе на параметрическую модель нормирования в строительстве. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):131–147. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-131-147)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.02.2025

Поступила после рецензирования 21.03.2025

Принята к публикации 27.03.2025

SAFETY OF BASES AND FOUNDATIONS IN THE TRANSITION TO THE PARAMETRIC STANDARDIZATION MODEL OF CONSTRUCTION

I.V. KOLYBIN✉, Cand. Sci. (Engineering)

D.E. RAZVODOVSKY, Cand. Sci. (Engineering)

A.V. SKORIKOV, Cand. Sci. (Engineering)

Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. Since September 2024, the construction industry of the Russian Federation has begun a gradual transition from the prescriptive method of standardization to a parametric approach establishing key requirements for design objects. In this regard, the regulatory framework must be revised to ensure the development of alternative methods and mechanisms for substantiating the compliance of design values and characteristics with safety requirements for both the structure as a whole and its bases and foundations.

Aim. To review the global experience of parametric standardization in geotechnics, identify key design requirements, and analyze methods for ensuring the safety of design solutions for bases and foundations.

Materials and methods. The analysis includes the study of domestic and foreign regulatory and methodological documents, as well as comparative calculations of test examples.

Results. We have established the obligatory requirements for design solutions of bases and foundations under the parametric standardization method.

Conclusions. The transition of the domestic standard system to the parametric method of construction design requires a certain time period. The requirements for compliance with the safety of bases and foundations in the parametric system of standards must still be achieved through ensuring reliability criteria during inspections of foundations, structures, and buildings for limit states by calculation, testing, and simulation. Scientific research, geotechnical monitoring, and observational methods, as well as geotechnical risk assessment will play an ever-increasing role in confirming the compliance of design solutions with regulatory requirements.

Keywords: parametric standardization, base, foundation, geotechnics, safety, key parameters, reliability

For citation: Kolybin I.V., Razvodovsky D.E., Skorikov A.V. Safety of bases and foundations in the transition to the parametric standardization model of construction. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):131–147. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-131-147)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

The study was carried out under the contract between JSC Research Center of Construction and Federal Center for Regulation, Standardization, and Technical Assessment in Construction (FAU "FCC").

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

*Received 11.02.2025**Revised 21.03.2025**Accepted 27.03.2025*

Введение

В соответствии с последними изменениями, внесенными в Федеральный закон от 29 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [1] и вступившими в силу с 1 сентября 2024 г., строительная отрасль Российской Федерации должна трансформировать принципы технического регулирования в строительстве и перейти на параметрическую модель нормирования.

Стратегия развития строительной отрасли предусматривает поэтапный переход от предписывающего метода нормирования к параметрическому методу, обеспечивающему максимально быстрое внедрение инноваций при гарантированном соблюдении безопасности технических решений. В этих целях должен быть осуществлен пересмотр нормативной правовой базы, а также обеспечено развитие альтернативных способов и механизмов обоснования соответствия проектных значений и характеристик сооружения в целом и его оснований и фундаментов требованиям безопасности. Требования перехода на параметрическую модель неизбежно внесут существенные изменения как в номенклатуру, так и в содержание действующих в настоящее время нормативных документов.

Параметрический метод нормирования исходит из определения нормативных требований, при котором установление ключевых требований применяется только к функциональным и (или) эксплуатационным характеристикам объекта нормирования, в том числе в виде требований к количественным параметрам, вне зависимости от его конструкции и исполнения. При этом методы подтверждения этих ключевых требований устанавливаются с возможностью применения допустимых и (или) альтернативных решений. Вопрос установления ключевых геотехнических требований до последнего времени также оставался открытым.

Параметрический метод проектирования открывает широкую свободу выбора средств и методов доказательства соответствия проектных решений требованиям безопасности. Свобода выбора повлечет за собой необходимость обеспечить на уровне нового поколения строительных норм минимально требуемый уровень безопасности для всех зданий и сооружений в зависимости от их назначения, а также необходимость углубленной экспертизы проектных решений в области геотехники, оснований и фундаментов. Такая экспертиза станет весьма трудоемкой, а порой и вообще затруднительной, что связано с тем, что задачи механики грунтов характеризуются нелинейностью, неоднозначностью расчетных предположений, значительным разбросом исходных данных и результатов прогноза. Многие решения могут быть верифицированы только либо на сопоставлении с результатами экспериментов, либо на сравнении с накопленным опытом, суммированным в действующих сводах правил. В таких обстоятельствах неизбежно будут возрастать значение и роль научно-технического сопровождения геотехнических разделов проектов уникальных и технически сложных объектов строительства.

Опыт перехода на параметрическую модель проектирования
в зарубежных странах

Строительные нормы, используемые до недавнего времени в большинстве развитых стран, являлись комплексными и в большей или меньшей степени совмещали оба эти подхода – предписывающий и параметрический. Т. е. проектной организации предоставлялась возможность либо обосновывать свои решения ссылками на процедуры, описанные в нормативных документах, либо обосновывать проектные параметры иными методами.

Несмотря на большую работу, проделанную в ряде стран по переходу на параметрическую модель нормирования, понимание безоговорочного преимущества параметрического метода проектирования по сравнению с комбинированным методом у инженеров и ученых отсутствует. Можно привести результаты статистического опроса практикующих респондентов, выполненного в Великобритании [2]. Результаты такого опроса проиллюстрированы на рис. 1 и отражают отношение опрошенных специалистов к параметрическому проектированию по пяти критериям. Респонденты сошлись только в одном – переход на параметрическое проектирование однозначно заставляет изменить привычный образ мысли проектировщиков. В своих оценках экономической привлекательности параметрического

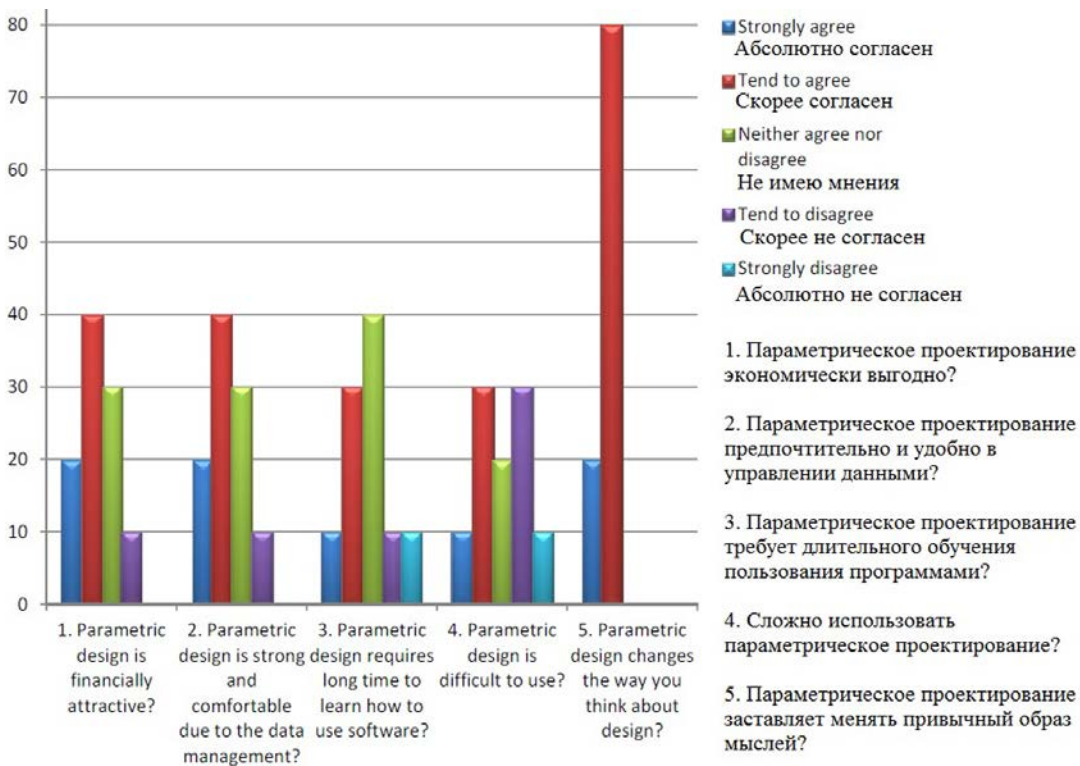


Рис. 1. Оценка параметрического проектирования основана на пяти критериях: финансы, управление данными, время обучения, проблемы использования и изменения в подходах к проектированию. Сравнение приведено по пятибалльной шкале Лайкерта

Fig. 1. Evaluation of parametric design is based on five criteria: finance, data management, learning curve, usability issues, and changes in design approaches. The comparison is given on a five-point Likert scale

проектирования специалисты разошлись во мнениях – 40 % опрошенных сомневаются в прямых экономических преимуществах параметрического подхода.

По пути комбинированного использования параметрического и предписывающего подходов с перспективой поэтапного полного перехода на параметрическое проектирование в настоящее время развиваются нормативные системы в КНР и Японии.

Наиболее продуманной, логично выстроенной и успешно внедренной к практическому использованию в большом количестве стран сегодня является система параметрического нормирования и проектирования строительных объектов стран членов ЕС – нормы Еврокодов [3]. Еврокоды в настоящее время приняли в качестве основных или сопутствующих национальной системе норм более 45 государств. В странах, не являющихся членами ЕС, официально получено одобрение применения Еврокодов в качестве альтернативных стандартов в странах: Беларусь, Узбекистан, Казахстан, Сингапур, Украина. Отметим, что в России основные прогрессивные положения Еврокодов уже были учтены ранее при частичной гармонизации отечественной нормативной базы, а говорить о целесообразности присоединения к системе Еврокодов в обстановке требуемого технологического суверенитета сегодня не приходится.

Система Еврокодов базируется на параметрическом подходе к конструктивному проектированию, устанавливающим цели и ключевые требования к объектам проектирования, на общих подходах и принципах проектирования и расчетов по предельным состояниям, использовании базовых положений теории надежности. Важно, что в Еврокодах содержатся «принципы», т. е. обязательные требования общего характера, и «правила применения», которые являются рекомендательными и детализируют положения «принципов». Каждая страна, использующая систему Еврокодов, может иметь свое национальное приложение, в котором сформулированы свои собственные «правила применения», не противоречащие «принципам». В частности, в разных странах могут быть утверждены свои собственные проектные подходы, значения частных коэффициентов надежности, соответствующие национальному опыту и инженерно-геологическим, климатическим, сейсмическим и прочим условиям. Является заблуждением, что существует полная унификация проектных требований и расчетов, используемых в параметрическом методе проектирования оснований и фундаментов в соответствии с Еврокодом 7 [4]. В отдельных странах ЕС разные виды расчетов могут выполняться с применением разных проектных подходов и разными комбинациями частных коэффициентов надежности.

Интерес представляет собой сопоставление результатов решения специалистами различных стран инженерных задач с применением документов Еврокод, национальных приложений этих стран и национального опыта. Сопоставление решения шести классических типовых задач, представленных на рис. 2, приведено в табл. 1 [5]. Расчеты выполнены геотехниками из 12 стран, разброс искомых проектных параметров в странах ЕС при использовании единого нормативного документа Еврокод 7 [4] может таким образом составлять от 24 до 62 %. Разброс этот связан с различным национальным опытом использования частных коэффициентов надежности, что в конечном итоге приводит к различной надежности и долговечности проектируемых фундаментов.

Приведенный пример делает очевидным, что различия в величинах искомых проектных геотехнических параметров связаны не столько с различиями в методах расчета, сколько в используемых комбинациях частных коэффициентов надежности, а следовательно, в нормативной вероятности отказа в эксплуатационный период.

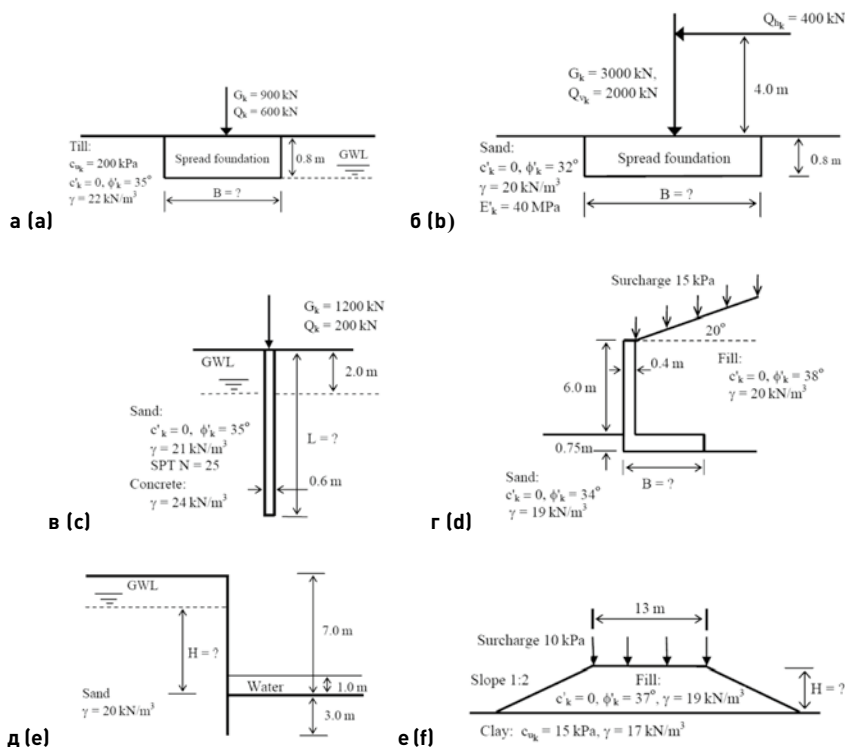


Рис. 2. Типовые примеры геотехнических задач [5]: а – центрально нагруженный ленточный фундамент; б – внецентренно нагруженный ленточный фундамент; в – буровая свая; г – угловая подпорная стенка; д – гидравлическое разрушение дна котлована; е – грунтовая насыпь на слабом основании
Fig. 2. Typical examples of geotechnical problems [5]: a – centrally loaded strip foundation; б – eccentrically loaded strip foundation; в – bored pile; г – angle retaining wall; е – hydraulic destruction of the excavation pit bottom; f – soil embankment on a weak base

Таблица 1

Сопоставление расчетов типовых задач в 12 странах в соответствии с [4]

Table 1

Comparison of typical calculation tasks for 12 countries in accordance with [4]

Типовой пример	Искомый проектный параметр	Разброс значений, (среднее значение)	% разброса значений
а	<i>B</i> – ширина фундамента	1,4–2,3 м [1,9 м]	± 24 %
б	<i>B</i> – ширина фундамента	3,4–5,6 м [3,9 м]	± 24 %
в	<i>L</i> – длина сваи	10,0–42,8 м [20,5 м]	± 62 %
г	<i>B</i> – ширина основания	3,1–5,2 м [4,3 м]	± 37 %
д	<i>H</i> – гидравлический напор	3,3–8,8 м [4,9 м]	± 45 %
е	<i>H</i> – высота насыпи	1,6–3,4 м [2,4 м]	± 36 %

Попытку параллельно использовать национальные системы норм, основанные на советском опыте и предписывающем методе нормирования, и международную систему нормирования Еврокод с введением своих национальных приложений предприняли две бывшие республики СССР – Беларусь и Казахстан. Обе эти попытки, по мнению авторов статьи,

следует признать неудачными из-за невозможности соблюдения полного технологического суверенитета, необоснованно сжатых сроков введения альтернативных норм ЕС и отсутствия соответствующей образовательной программы подготовки и переподготовки инженерных кадров.

Перевод строительной отрасли на параметрический метод нормирования и проектирования в нашей стране требует четкой формулировки целей, поэтапного (частичного) внедрения и использования переходного периода, необходимого для разработки ключевых нормативных документов нового поколения, приобретения проектными организациями опыта проектирования с использованием инновационных принципов, подготовки экспертов органов экспертизы к решению более сложных задач, изменения учебных планов и совершенствования обучения слушателей строительных специальностей высших учебных заведений, переподготовки действующих специалистов.

Ключевые требования при проектировании оснований и фундаментов

В основе параметрического метода нормирования лежит иерархическая пирамида нормативных положений и требований, состоящая из трех уровней. Верхние два уровня нормативных положений должны являться безальтернативными и обязательными к исполнению.

Таким образом, для перехода к параметрическому нормированию должны быть определены цели и задачи нормирования (первый уровень) и ключевые требования к объектам нормирования (второй уровень). Целями и задачами нормирования оснований и фундаментов является обеспечение безопасности зданий и сооружений на всех этапах их жизненного цикла при условии выполнения основаниями и фундаментами своего функционального назначения.

Ключевое требование – это требование, выполнение которого в течение всего жизненного цикла здания или сооружения (включая его реализацию в процессе строительства, реконструкции, капитального ремонта, а также поддержание состояния таких параметров и характеристик зданий и сооружений, заданных условиями на требуемом уровне в процессе эксплуатации) непосредственно обеспечивает выполнение соответствующих поставленных задач.

Для обеспечения безопасности зданий и сооружений на всех этапах их жизненного цикла совокупность применяемых решений оснований и фундаментов должна соответствовать ключевым требованиям надежности и долговечности. Формулировка одних лишь требований надежности является недостаточной, поскольку надежность оснований и фундаментов может устанавливаться относительно к одному году эксплуатации сооружения. В общем случае надежность зависит от регламентного срока службы сооружений и снижается, как правило, в процессе эксплуатации. Следовательно, для оснований и фундаментов должны совместно с требованиями надежности формулироваться требования долговечности. Минимальные требования надежности и долговечности должны быть закреплены на федеральном уровне в зависимости от класса ответственности зданий и сооружений.

Понятие минимально требуемой долговечности достаточно легко увязать с минимальным сроком эксплуатации сооружения, нормируемым в настоящее время в ГОСТ 27751-2014 [6]. Таким образом, если бы в нормативных документах федерального уровня были установлены требования к допустимой вероятности отказа в год применительно к предельным состояниям

Таблица 2

Соотношение индекса надежности и вероятности отказа

Table 2

Ratio of reliability index and failure probability

Индекс надежности β	Вероятность отказа	Степень безопасности эксплуатации
1,0	0,16	Опасная
1,5	0,07	Неудовлетворительная
2,0	0,023	Низкая
2,5	0,006	Ниже средней
3,0	0,001	Выше средней
4,0	0,00003	Хорошая
5,0	0,0000003	Высокая

первой и второй групп для зданий и сооружений различного функционального назначения, то вопрос о ключевых требованиях надежности для перехода на параметрический метод можно было бы считать решенным. Однако в настоящее время в нормативных документах отсутствуют единые требования к уровню надежности проектируемых сооружений, который определяется по-разному в различных сводах правил полуэмпирическим методом с применением различных наборов частных коэффициентов надежности.

Переход к единым требованиям к надежности сооружений необходим в случае использования параметрического метода проектирования, хотя авторы понимают сложность этой задачи, требующей дополнительных исследований. В качестве одного из возможных вариантов единых требований надежности можно было бы предложить использование величины индекса надежности β , аналогично тому, как она используется в системе Еврокодов [1]. Связь величины индекса надежности с вероятностью отказа сооружения проиллюстрирована в табл. 2 в соответствии с [7].

На наш взгляд, надежностью и долговечностью не могут исчерпываться ключевые требования к основаниям и фундаментам, равно как и к иным строительным конструкциям. Проектное решение может обладать требуемой степенью надежности и долговечности, но быть нецелесообразным – слишком дорогим или слишком сложным в исполнении, что делает такое решение неэффективным и нерациональным. Выбор проектных решений оснований и фундаментов должен осуществляться на основании технико-экономического сравнения вариантов.

Из всех совокупностей реализуемых проектных решений оснований и фундаментов, обладающих в равной степени надежностью и долговечностью, должны выбираться наиболее эффективные (экономичные или целесообразные) в соответствии с заранее установленным критерием. В качестве критериев эффективности могут быть приняты, например: минимизация стоимости строительства и эксплуатации, минимизация сроков строительства, минимизация объемов материалов, минимизация влияния на окружающую застройку, минимизация экологического ущерба, минимизация числа строительного персонала и проч.

Проблемные вопросы расчетов оснований и фундаментов

В нормативных документах нового поколения, соответствующих требованиям параметрического подхода, должны быть формализованы возможности получения множественных допустимых альтернативных проектных решений оснований и фундаментов, каждое из которых должно обеспечивать ключевые эксплуатационные требования. Требования соблюдения безопасности зданий и сооружений достигаются путем обеспечения критериев надежности при проверке оснований, конструкций и сооружений в целом по предельным состояниям. Такие проверки могут быть выполнены расчетным путем, испытаниями, моделированием и с помощью иных методов подтверждения соответствия, установленных в [1].

Обоснование проектных решений путем расчетов является наиболее распространенным способом подтверждения соответствия ключевым требованиям. Простейшие расчетные методики (для расчетов без использования вычислительной техники) по-прежнему могут непосредственно приводиться в нормативных документах нижних уровней новой параметрической системы.

Однако следует ожидать, что все больший объем обосновывающих расчетов будет выполняться численно с использованием программных средств и вычислительной техники. Такие расчеты будут требовать высокой квалификации как специалиста-расчетчика, так и эксперта, проверяющего корректность проектных решений. В нормативных документах новой системы должны быть предусмотрены требования по соответствующей верификации численных моделей.

Неправильный выбор модели поведения грунта в численных расчетах может привести не только к ошибочным проектным решениям, но и к серьезным аварийным ситуациям. Одной из наиболее известных и трагичных аварий, произошедших преимущественно из-за неправильного выбора расчетной модели, стало обрушение котлована при строительстве транспортного тоннеля в условиях слабых глинистых отложений Сингапура рядом с шоссе Никол Хайвей в апреле 2004 года [8].

Авария произошла на участке тоннеля, устраиваемого в котловане открытым способом и примыкающего к круглой в плане опускной шахте. Ограждение котлована было выполнено способом «стена в грунте», толщина стены составляла 0,8 м. В соответствии с проектом крепление котлована глубиной 33 м выполнялось с помощью 10 ярусов металлических распорок и двух грунтоцементных плит (рис. 3а). Авария произошла на стадии удаления верхней грунтоцементной плиты и подготовки к установке последнего яруса распорок, когда глубина экскавации составляла около 30 м. Обрушение ограждения котлована на длине более 100 м носило быстрый и катастрофический характер (рис. 3а). В отчете комиссии по расследованию в качестве основной причины аварии указывалась недооценка величин нагрузок, передаваемых на ограждение котлована, в результате использования неадекватной модели грунта. Действительно, в проекте для слабых водонасыщенных глин использовалась идеальная упруго-пластическая модель Кулона – Мора с эффективными значениями характеристик сопротивления сдвигу, при этом поведение глин предполагалось недренированным. В таком подходе при моделировании экскавации котлована методом конечных элементов (МКЭ) в грунте возникают фиктивные отрицательные поровые давления, а эффективная сдвиговая прочность грунта необоснованно завышается, что приводит к серьезным проектным ошибкам.

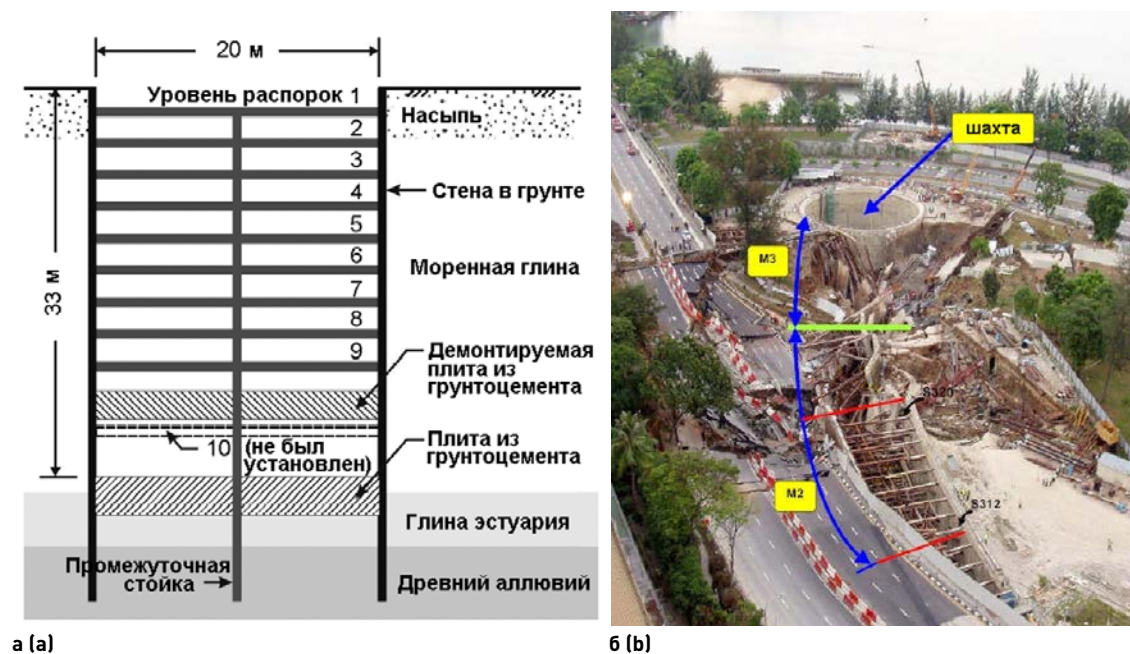


Рис. 3. Авария тоннеля Николл Хайвей: а – разрез котлована; б – картина аварии
Fig. 3. Nikoll Highway tunnel accident: a – excavation pit section; b – accident scene

Выбор правильной нелинейной модели поведения грунта, соответствующей специфике решаемой конкретной геотехнической задачи, не единственная проблема при выполнении численных расчетов, которые не могут быть регламентированы однозначными требованиями нормативных документов.

В ряде геотехнических задач в силу их физической, геометрической и конструктивной нелинейности сложно, а порой невозможно правильно назначить комбинации коэффициентов надежности, используемых в численных моделях.

Для иллюстрации этого утверждения рассмотрим задачу численного расчета методом отсеков устойчивости склона, подкрепленного подпорными стенами, на которые передаются полезные вертикальные нагрузки (рис. 4). Расчетчик заранее не знает, как пройдет критическая поверхность скольжения и геометрическое положение центра вращения – точки O . Следовательно, он не может заранее правильно задать коэффициент надежности для нагрузки P , которая может носить характер как удерживающей, так и сдвигающей нагрузки. Аналогично невозможно заранее знать, вес какой части массива грунта будет сдвигающей силой ($W1$) или удерживающей ($W2$), вследствие этого коэффициент надежности для удельного веса грунта следует принимать в подобных случаях равным 1,0 для всей расчетной модели.

Позволяя при переходе на параметрическое нормирование решать широкий спектр геотехнических задач, математическое моделирование тем не менее при разработке расчетных моделей может создавать значительное количество сложностей и ловушек на пути к получению надежных проектных решений. Практика выполнения МКЭ расчетов оснований, фундаментов и подземных сооружений показывает, что результаты моделирования одной и той же задачи различными расчетчиками могут существенно различаться, иногда до нескольких раз. Часто это связано не с квалификацией расчетчика, а с математическими

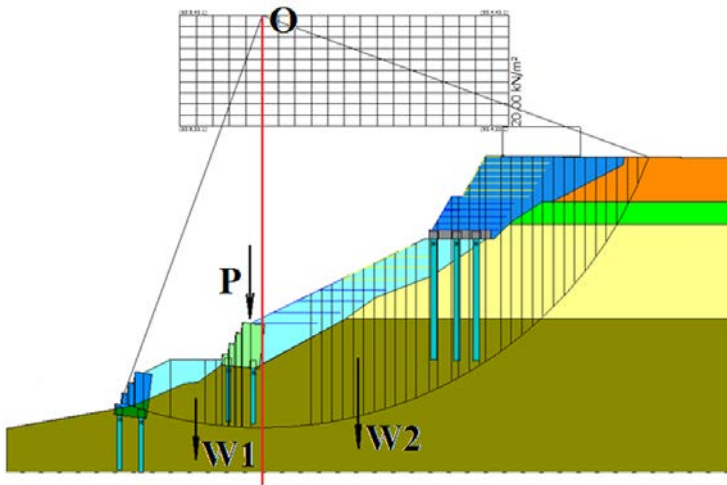


Рис. 4. Пример неопределенности назначения коэффициентов надежности по нагрузке

Fig. 4. Example of uncertainty in assigning load safety factors

особенностями самих моделей. В силу этого переход на параметрическое нормирование предполагает нормативные требования по анализу чувствительности численных расчетных моделей.

Под чувствительностью МКЭ моделей, используемых при расчете фундаментов и конструкций, взаимодействующих с основанием, следует понимать способность модели приводить к существенно различным результатам расчетов при незначительных изменениях одного параметра или группы однотипных параметров модели, а также количественная характеристика этой способности [9, 10]. Чувствительность модели может проявляться по отношению к значительному количеству факторов: геологическому строению площадки, физико-механическим характеристикам грунтов, конструктивным особенностям расчетной схемы сооружения, характеристикам конструктивных элементов, особым нагрузкам и воздействиям и проч. В нормах для чувствительных расчетных моделей должна быть регламентирована возможность использования обобщенных коэффициентов надежности численных моделей, которые применяются относительно результатов расчетов, а не исходных данных.

Геотехнический мониторинг и наблюдательный метод

Критерием истины всегда служит практика. В силу этого правильность наших расчетов и безопасность проектных решений необходимо, как правило, проверять в процессе строительства. Этим целям служит геотехнический мониторинг, зарекомендовавший себя как очень важное средство обеспечения безопасности геотехнического строительства и нашедший соответствующее отражение в действующих нормативных документах. «Геотехнический мониторинг» как специальный термин и техническое понятие появился в России впервые в 1994 году при строительстве на Манежной площади в Москве многоэтажного подземного комплекса «Охотный ряд». С тех пор требования геотехнического мониторинга при строительстве в сложных грунтовых и стесненных городских условиях прочно укоренились в строительной практике, позволив предотвратить многие серьезные аварийные ситуации.

Однако, если геотехнический мониторинг показывает существенные отклонения контролируемого параметра от расчетного прогноза, чтобы избежать аварии, необходимо вносить изменения в проект. Таким образом, при использовании геотехнического мониторинга и обратных расчетов проектирование может становиться интерактивным. Такой метод проектирования уже достаточно давно используется в странах ЕС, регламентирован в [4] и получил название «наблюдательный метод».

Наблюдательный метод – метод проектирования, изначально предполагающий возможность корректировать проект на основании результатов геотехнического мониторинга [11]. В действующей системе нормативных документов наблюдательный метод регламентирован в трех сводах правил, хотя на практике применяется не так часто, что связано во многом с требованиями согласования сметной стоимости до начала строительства.

Наблюдательный метод бывает необходим в тех случаях, когда прогноз поведения оснований и фундаментов, выполненный на основании расчетных или экспериментальных работ, затруднен или результаты расчета имеют значительный разброс. Следует учитывать, что наблюдательный метод может быть применен не во всех проектных случаях. Такой подход нельзя использовать, если предельное состояние конструкции или основания может наступить в очень быстрые сроки, недостаточные для реализации альтернативных проектных решений, если системы мониторинга обладают определенной инерционностью по отношению к измеряемым величинам, если контролируемые параметры трудно обоснованно назначить.

В качестве контролируемых параметров наблюдательного метода, как правило, следует выбирать перемещения или деформации, которые могут быть измерены непосредственно. В ряде случаев в качестве контролируемых параметров могут выступать напряжения или усилия. Для принятия решений о необходимости внесения изменений в проект параметрам, контролируемым в процессе геотехнического мониторинга, еще до начала строительства должны быть назначены предельные значения. Предлагается для назначения предельных значений измеряемых величин использовать так называемую «схему светофора», приведенную

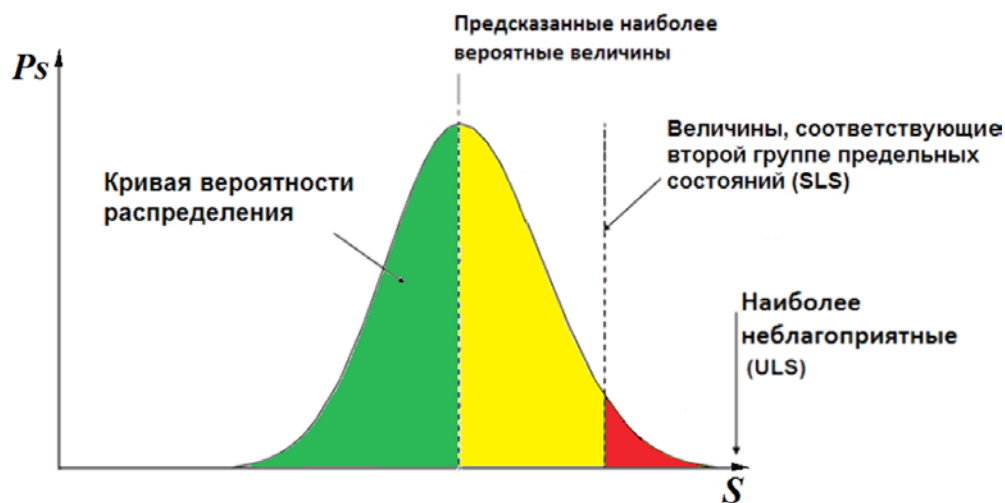


Рис. 5. Расчетная плотность распределения P_S контролируемого параметра S при использовании наблюдательного метода

Fig. 5. Calculated distribution density P_S of the controlled parameter S using the observational method

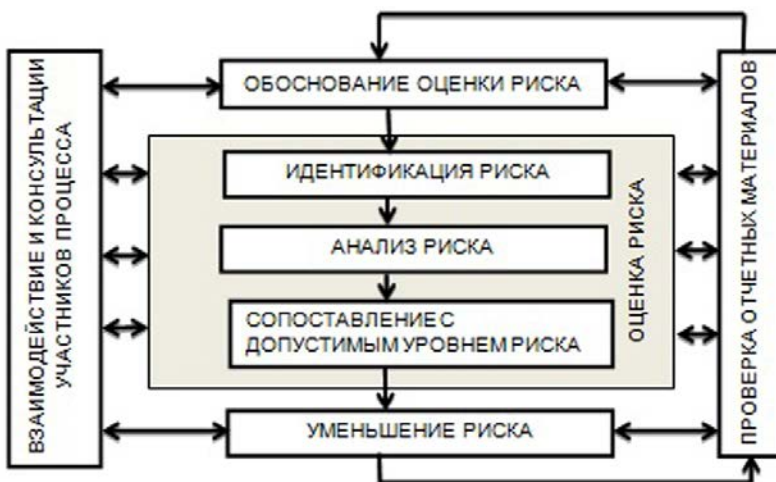
на рис. 5. Зеленый диапазон значений параметра соответствует фазе выполнения проекта по первоначальным оптимистичным решениям. Предельная граница зеленого диапазона соответствует математическому ожиданию (нормативному значению) контролируемого параметра, полученному расчетным путем. Желтый диапазон на графике относится к фазе принятия решения о переходе на новые более консервативные проектные решения. Правая граница желтого диапазона соответствует расчетному значению для второй группы предельных состояний. Красный диапазон значений контролируемой величины является недопустимым, соответствующим близости аварийной ситуации.

В нормативных документах новой параметрической системы должны содержаться правила по применению наблюдательного метода в геотехническом строительстве. К ним могут относиться правила, устанавливающие: в каких случаях следует применять наблюдательный метод; последовательность действий и алгоритмы принятия решений при применении наблюдательного метода; требования к установлению контролируемых критериев и параметров, их допустимых пределов изменения; требования к геотехническому мониторингу и анализу его результатов.

Оценка геотехнических рисков

В определенных случаях для обоснования проектных решений в качестве дополнительного инструмента анализа следует использовать методики оценки геотехнических рисков в соответствии с блок-схемой на рис. 6 [12].

В геотехническом проектировании оценку риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий целесообразно выполнять в том случае, если эти воздействия имеют случайный характер и малую вероятность, но в случае их проявления способны привести к тяжелым социальным и экономическим последствиям.



Общая схема процесса оценки рисков

Рис. 6. Общая схема оценки геотехнических рисков
Fig. 6. General scheme of geotechnical risk assessment

К ним помимо опасных инженерно-геологических и иных природных процессов могут относиться преимущественно аварийные нагрузки и воздействия.

Следует понимать, что оценка рисков не может полностью заменить расчеты или испытания, выполняемые в целях определения проектных характеристик оснований и фундаментов, так как она используется лишь для анализа возможности реализации и последствий воздействий, имеющих очень малую статистическую вероятность. Все прочие нагрузки и воздействия должны быть учтены в проекте традиционными методами. Оценка рисков может безусловно повлиять на окончательные значения проектных характеристик, установленных другими способами, путем ответа на вопрос: допустим ли риск возникновения того или иного маловероятного события?

Допустимые уровни риска могут устанавливаться на федеральном уровне, как, например, для пожарных рисков, могут устанавливаться заказчиком или проектной организацией в зависимости от уровня и сложности решаемых задач. Вопросы, связанные с регулированием допустимых рисков для зданий и сооружений различного класса ответственности и функционального назначения, требуют своего дальнейшего развития и государственного регулирования на верхнем уровне документов параметрической системы нормирования в строительстве в целом, а не только в области проектирования оснований и фундаментов.

Требования по обоснованию проектных решений путем оценки рисков сегодня в действующих нормативных документах отражены пока слабо и в недостаточном объеме. При переходе на параметрическую модель нормирования требования оценки рисков следует развить и дополнить. В параметрических документах нижнего уровня, в которых могут содержаться методические положения, должны содержаться правила выполнения оценки риска возникновения опасных природных процессов и техногенных воздействий. В них могут содержаться правила: устанавливающие, в каких случаях следует применять оценку рисков в целях комплексного обоснования проектных решений; по идентификации рисков; по установлению задач оценки рисков; по анализу рисков; по корректировке проектных решений на основании риск-анализа.

Испытания и исследования

Если расчетные методы или модели оснований и фундаментов отсутствуют либо недостаточно достоверны, при проектировании следует использовать результаты модельных или натурных испытаний. На практике испытания выполняют при проектировании свайных фундаментов, грунтоцементных элементов, грунтовых анкеров, конструкций нагелей, армированных искусственных оснований, геотекстильных элементов.

В нормативных документах новой параметрической системы должен содержаться ряд положений и требований к обоснованию проектных решений путем испытаний, в том числе к количеству испытаний, к критериям подобия для модельных испытаний, к повторяемости результатов, к отбраковке ошибочных данных.

Обоснование проектных решений путем исследований допускается предусматривать в тех случаях, когда опыт расчета и проектирование новых геотехнических конструкций или искусственных оснований отсутствуют, а выполнение испытаний затруднительно или не может обеспечить достаточную достоверность и повторяемость получаемых результатов.

Такие исследования предусматривают, как правило, в рамках выполнения научно-технического сопровождения проектирования и строительства зданий и сооружений класса КС-3, а также при их реконструкции. Программа научно-технического сопровождения геотехнического проектирования должна включать в себя способы решения поставленных задач на основе результатов аналитических или численных исследований, экспериментальных исследований на физических моделях (маломасштабных или натурных). В последние годы широкое применение получают также статистические методы исследований, основанные на анализе и статистической обработке большого количества документально подтвержденных натурных данных, относящихся к однотипным задачам проектирования оснований и фундаментов в однотипных инженерно-геологических условиях.

В ближайшем будущем следует ожидать появления специализированных баз данных, аккумулирующих накопленный практический опыт проектирования и строительства и позволяющих на основе его обработки с помощью искусственного интеллекта определять искомые проектные параметры. Конечно, такие решения не могут претендовать на истину в последней инстанции, но могут являться достаточно достоверной дополнительной проверкой проектных решений, принятых на основании расчетов.

Заключение

Планируемый перевод системы отечественных норм на параметрический метод проектирования в строительстве требует переходного периода, в течение которого должны быть разработаны ключевые нормативные документы новой системы, а вместе с тем должно быть возможно использование сводов правил и стандартов, действующих в настоящее время.

Целями параметрического нормирования оснований и фундаментов является обеспечение безопасности зданий и сооружений на всех этапах их жизненного цикла. Определенные нормативные требования к функциональным характеристикам оснований и фундаментов должны быть предусмотрены нормативными документами для стадий проектирования, строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

Совокупность применяемых решений проектирования оснований и фундаментов должна соответствовать ключевым требованиям параметрического нормирования: надежности, долговечности и эффективности (экономичности). Ключевые требования являются безальтернативными, они должны устанавливаться нормативными документами первого (верхнего) уровня. Нормативные документы параметрической системы должны включать в себя четкие и однозначные требования по минимально допустимым уровням надежности для зданий и сооружений различного назначения, их конструктивных элементов и грунтовых оснований. В этих целях требуется выполнение дополнительных научных исследований.

Требования соблюдения безопасности оснований и фундаментов зданий и сооружений в параметрической системе нормативных документов по-прежнему должны достигаться путем обеспечения критериев надежности при проверках оснований, конструкций и сооружений в целом по предельным состояниям, которые могут быть выполнены расчетным путем, испытаниями, моделированием и проч. Важнейшими инструментами обеспечения безопасности в геотехническом строительстве являются мониторинг, наблюдательный метод, испытания и контроль качества скрытых работ, оценка геотехнических рисков.

Список литературы

1. Федеральный закон от 30.12.2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=475858>
2. Zarei Y. The Challenges of Parametric Design in Architecture Today: Mapping the Design Practice. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Master of Philosophy (MPhil) in the Faculty of Humanities. School of Environment and Development; 2012 [internet]. Available at: <https://parametric-architecture.com/wp-content/uploads/2018/11/The-Challenges-of-Parametric-Design-in-Architecture-Today.pdf>.
3. EN 1990: Eurocode. Basis of structural and geotechnical design. European Committee for Standardization.
4. EN 1997-1: Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1: General rules. European Committee for Standardization. <https://doi.org/10.3403/30401997>
5. Orr T.L.L., Farrel E.R. Geotechnical design to Eurocode 7. London: Springer; 1999. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0803-0>
6. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2015.
7. Kulhawy F.H., Phoon K.K. Observations on geotechnical reliability-based design development in North America. In: Foundation design codes and soil investigation in view of international harmonization and performance based design. Proc. of the International Workshop, IWS Kamakura 2002, Tokyo, Japan. A.A. Balkema Publishers; 2002, pp. 31–48.
8. Колыбин И.В. Уроки аварийных ситуаций при строительстве котлованов в городских условиях. В: Развитие городов и геотехническое строительство: тр. Междунар. конф. по геотехнике, Санкт-Петербург, 16–18 июня 2008 г. Т. 3. Санкт-Петербург: Георекострукция-Фундаментпроект; 2008, с. 89–124.
9. Колыбин И.В., Астряб В.В. Детерминированный подход к оценке чувствительности МКЭ моделей при совместном расчете сооружения с основанием. В: Сборник научных трудов НИИОСП им. Н.М. Герсевича. Вып. 100. Москва: Научно-исследовательский проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство»; 2011, с. 156–169.
10. Скорилов А.В., Павловский Н.А. Стохастический подход к оценке надежности результатов расчета оснований и фундаментов в зависимости от чувствительности МКЭ-моделей. Вестник НИЦ Строительство. 2021;29(2):101–111. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\(29\)-101-111](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-101-111)
11. Разводовский Д.Е., Колыбин И.В., Анисимов И.Г., Фокин Н.Н. Обзор возможностей и перспективы применения наблюдательного метода. Промышленное и гражданское строительство. 2016;(10):55–63.
12. Разводовский Д.Е., Скорилов А.В., Разводовская И.А. Методические рекомендации по оценке геотехнического риска в условиях плотной городской застройки. Вестник НИЦ Строительство. 2021;29(2):88–100. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\(29\)-88-100](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-88-100)

References

1. Federal Law of 30.12.2009 No. 384-FZ "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=475858>. (In Russian).
2. Zarei Y. The Challenges of Parametric Design in Architecture Today: Mapping the Design Practice. A thesis submitted to The University of Manchester for the degree of Master of Philosophy (MPhil) in the Faculty of Humanities. School of Environment and Development, 2012.
3. EN 1990: Eurocode. Basis of structural and geotechnical design. European Committee for Standardization. <https://doi.org/10.3403/30392671>
4. EN 1997-1: Eurocode 7. Geotechnical Design. Part 1: General rules. European Committee for Standardization.
5. Orr T.L.L., Farrel E.R. Geotechnical design to Eurocode 7. London: Springer; 1999. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-0803-0>.
6. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
7. Kulhawy F.H., Phoon K.K. Observations on geotechnical reliability-based design development in North America. In: Foundation design codes and soil investigation in view of international harmonization and performance

based design. Proc. of the International Workshop, IWS Kamakura 2002, Tokyo, Japan. A.A. Balkema Publishers; 2002, pp. 31–48.

8. Kolybin I.V. Lessons from emergency situations during excavation construction in urban conditions. In: City Development and Geotechnical Construction: Mat. Int. Conf. on Geotechnics, St. Petersburg, June 16–18, 2008. Vol. 3. St. Petersburg, Georekonstruktsiya-Fundamentproekt Publ.; 2008, pp. 89–124. [In Russian].

9. Kolybin I.V., Astryab V.V. Deterministic approach to assessing the sensitivity of FEM models in the combined calculation of a structure with a foundation. In: Collection of scientific papers of the N.M. Gersevanov Research Institute of Structures and Instrumentation. Is. 100. Moscow: NIIOСП named after N.M. Gersevanov is a structural subdivision of JSC Research Center of Construction; 2011, pp. 156–169. [In Russian].

10. Skorikov A., Pavlovskiy N. Stochastic approach to assessing the reliability of the calculation results of bases and foundations depending on the sensitivity of the FEM-models. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021;29(2):101–111. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\(29\)-101-111](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-101-111)

11. Razvodovsky D.E., Kolybin I.V., Anisimov I.G., Fokin N.N. Overview of possibilities and prospects of the use of observational method. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2016;(10):55–63. [In Russian].

12. Razvodovsky D., Skorikov A., Razvodovskaya I. Methodological recommendations for assessing geotechnical risk in dense urban development. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021;29(2):88–100. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2\(29\)-88-100](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-2(29)-88-100)

Информация об авторах / Information about the authors

Игорь Вячеславович Колыбин , канд. техн. наук, начальник управления по научно-технической и нормативной политике, НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: kolybin@eccpf.ru

Igor V. Kolybin , Cand. Sci. (Engineering), Departmental Head, Department for Scientific, Technical and Regulatory Policy, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: kolybin@eccpf.ru

Дмитрий Евгеньевич Разводовский, канд. техн. наук, заместитель директора по научной работе, НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Dmitry E. Razvodovsky, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Director for Research, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

Андрей Викторович Скориков, канд. техн. наук, заведующий лабораторией методов расчета подземных сооружений и геотехнического прогноза, НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Andrey V. Skorikov, Cand. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Laboratory of Methods for Calculating Underground Structures and Geotechnical Forecasting, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

АНАЛИЗ ПРИМЕНЕНИЯ КЛАССИФИКАТОРОВ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ОБЯЗАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕДУР В СТРОИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ

А.А. ВОЛКОВ^{1,2}, д-р техн. наук
П.Д. ЧЕЛЫШКОВ^{1,✉}, д-р техн. наук
А.Е. ДАВЫДОВ¹, канд. техн. наук
А.А. НИКИТЕНКО¹

¹ АО «НИЦ «Строительство», ул. 2-я Институтская, д. 6, к. 1, г. Москва, 109428, Российская Федерация

² Институт архитектуры, Харбинский политехнический университет, ул. Сидачжи, д. 92, район Нанганг, Харбин, 150001, КНР

Аннотация

Введение. В статье рассматривается вопрос применения различных классификаторов при выполнении обязательных процедур в строительном комплексе, предусмотренных частями 3–7 статьи 52 Градостроительного кодекса Российской Федерации.

Цель. Исследование и анализ применения классификаторов при выполнении обязательных процедур в строительном комплексе, предусмотренных частями 3–7 статьи 52 Градостроительного кодекса Российской Федерации, и выявление случаев дублирования или отсутствия классифицирования информации классификатором строительной информации (КСИ).

Материалы и методы. Проведен анализ Постановления Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2021 года № 2490. По результатам анализа выделены основные процедуры и потребности. Затем был проведен анализ классифицирования каждой единичной потребности и установлены типы случаев применения классификаторов относительно применения КСИ.

Результаты. В результате исследования создана классификация случаев применения КСИ, а также процентное соотношение случаев применения КСИ в единичных потребностях при выполнении обязательных процедур в строительном комплексе, предусмотренных частями 3–7 статьи 52 Градостроительного кодекса Российской Федерации.

Выводы. Анализ показывает, что доля дублирования классификаторов в процессе классификации потребностей, составленных по ПП РФ № 2490, составляет 56,38 % (380 из 674 потребностей в целом), при этом доля упущенных потребностей составляет 20,33 %. Столь высокий процент дублирований приводит к выводу, что ведение КСИ в существующем виде приводит к существенным трудозатратам без достижения полезного эффекта. Представляется разумным ограничить область ответственности самостоятельного классификатора (название которого, вероятно, следует уточнить) теми позициями, где он несет самостоятельную ценность (для 24 % потребностей в рамках обязательных процедур).

Ключевые слова: информационное моделирование в строительстве, технологии информационного моделирования, ТИМ, информационная модель ОКС, цифровая информационная модель, классификатор строительной информации, КСИ, управление жизненным циклом объекта капитального строительства, обязательные процедуры в строительстве

Для цитирования: Волков А.А., Челышков П.Д., Давыдов А.Е., Никитенко А.А. Анализ применения классификаторов при выполнении обязательных процедур в строительном комплексе. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):148–158. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-148-158](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-148-158)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнено за счет средств финансирования Фонда поддержки и развития науки АО «НИЦ «Строительство».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 12.12.2024

Поступила после рецензирования 01.02.2025

Принята к публикации 06.02.2025

CLASSIFIERS IN MANDATORY PROCEDURES OF THE CONSTRUCTION COMPLEX

A.A. VOLKOV^{1,2}, Dr. Sci. (Engineering)

P.D. CHELYSHKOV¹, Dr. Sci. (Engineering)

A.E. DAVYDOV¹, Cand. Sci. (Engineering)

A.A. NIKITENKO¹

¹ JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation

² School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Xidazhi str., 92, Nangang District, Harbin, 150001, PRC

Abstract

Introduction. The article examines various classifiers applied to mandatory procedures of the construction complex, as provided for in parts 3–7 of Article 52 of the Urban Development Code of the Russian Federation.

Aim. To study and analyze the application of classifiers in mandatory procedures of the construction complex, provided for in parts 3–7 of Article 52 of the Urban Development Code of the Russian Federation; to identify cases of duplication or lack of information classification by the construction information classifier (CIC).

Materials and methods. We have identified the main procedures and needs according to the analysis of the Decree of the Government of the Russian Federation of December 25, 2021 No. 2490. Then, we have analyzed the classification of each individual need and determine the types of application cases for classifiers in relation to the CIC.

Results. As a result of the study, we have developed a classification of CIC application cases, as well as the percentage of CIC application in individual needs during the implementation of mandatory procedures in the construction complex, provided for in parts 3–7 of Article 52 of the Urban Development Code of the Russian Federation.

Conclusions. The performed analysis shows that the duplication of classifiers for the needs compiled in accordance with RF PP No. 2490 comprises 56.38% (380 out of 674 needs in total) with 20.33% of missed needs. Such a high percentage of duplications proves that the current CIC form leads to significant labor costs without achieving a useful effect. Therefore, it seems reasonable to limit the scope of responsibility for the independent clarified classifier to those positions where it has independent value, i.e., for 24% of the needs within the framework of mandatory procedures.

Keywords: information modeling in construction, building information modeling, BIM, information model of construction project, digital information model, construction information classifier, CIC, life cycle management of construction project, mandatory procedures in construction

For citation: Volkov A.A., Chelyshkov P.D., Davydov A.E., Nikitenko A.A. Classifiers in mandatory procedures of the construction complex. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):148–158. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-148-158](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-148-158)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

The study was carried out using funding from the Foundation for the Support and Development of Science of the JSC Research Center of Construction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 12.12.2024

Revised 01.02.2025

Accepted 06.02.2025

Методика проведения анализа классификаторов

Для проведения анализа были выбраны основные классификаторы, действующие в нормативно-правовом поле Российской Федерации, а именно:

- Классификатор строительной информации Минстроя России (КСИ) [1–3];
- Государственные элементные сметные нормы (ГЭСН) [4, 5];
- Общероссийский классификатор профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов (ОКПДТР) [6, 7];
- Общероссийский классификатор занятий (ОКЗ) [8, 9];
- Московская строительная система классификаторов (МССК) [10];
- Классификатор строительных ресурсов (КСР) [11, 12];
- Общероссийский классификатор единиц измерения (ОКЕИ) [13, 14];
- Московский территориальный строительный каталог (МТСК) [15–17];
- Общероссийский классификатор форм собственности (ОКФС) [18, 19];
- Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности (ОКПД 2) [20, 21].

КСИ как обязательный классификатор был принят объектом сравнения с другими классификаторами, перечисленными выше. Обязательность применения КСИ установлена в ГрК РФ, структура и состав КСИ установлены Приказом Минстроя России от 06.08.2020 № 430/пр «Об утверждении структуры и состава классификатора строительной информации» [2], а правила формирования и ведения КСИ установлены Постановлением Правительства РФ от 12.09.2020 № 1416 «Об утверждении Правил формирования и ведения классификатора строительной информации» [1].

В ходе анализа из Постановления Правительства Российской Федерации № 2490 от 25.12.2021 (ПП РФ № 2490) [22] были выделены основные процедуры. Затем выделенные процедуры были структурированы на основные потребности, классифицируемые любой строительной организацией на разных этапах жизненного цикла объекта капитального строительства. Далее были проведены группировка и объединение сходных по значению и смыслу потребностей.

В результате анализа был получен вывод, что все выявленные потребности можно объединить в следующие группы:

- I. Идентификация документации, предоставленной государственными органами;
- II. Идентификация документации, предоставленной для рассмотрения государственными органами;
- III. Идентификация проектной документации;
- IV. Идентификация документации, подтверждающей личность и ее полномочия;
- V. Идентификация сметной и финансовой документации;
- VI. Идентификация копий и переводов документов;
- VII. Идентификация документации, предоставленной различными организациями, товариществами, кооперативами или иными лицами;
- VIII. Идентификация документации, относящейся к процессу изысканий, испытаний и обследований объекта строительства и территорий;
- IX. Идентификация документации, представленной для ознакомления иным лицам.

Как показал дальнейший анализ, полученные группы не обладают информативностью, необходимой для его проведения, не отражают реальный факт классифицирования отдельных потребностей и не могут дать объем данных, достаточный для составления каких-либо выводов и выявления закономерностей в классификации потребностей. Вследствие этого было принято решение проводить анализ не по группам потребностей, а по каждой единичной потребности.

Следующим шагом стало выявление фактов классифицирования каждой единичной потребности со стороны каждого из приведенных выше классификаторов. При этом учитывалось, что некоторые классификаторы, включая принятый за объект сравнения классификатор КСИ [1–3], представляют из себя систему классификационных таблиц, охватывающих определенные предметные области классификации (например, КСИ [1–3], МССК [10], МТСК [15–17]), сопоставимых с классификаторами, охватывающими только одну предметную область (например, ГЭСН [4, 5], КСР [11, 12], ОКЕИ [13, 14]).

Полученные результаты были систематизированы по следующим случаям:

- дублирования (случай, когда определенная потребность может быть классифицирована как с использованием КСИ, так и с использованием одного или нескольких классификаторов);
- уникальности (случай, когда потребность может быть классифицирована только с использованием КСИ);
- упущения (случай, когда в КСИ отсутствует возможность классифицирования потребности).

На данном этапе был произведен расчет долей каждого представленного случая для каждой отдельной процедуры.

Результаты анализа классификаторов

Результаты анализа, проведенного по описанной выше методике, приведены в Приложении 1. Основные результаты приведены в таблице.

На основании проведенного анализа составлены три перечня:

1. Перечень потребностей в рамках обязательных процедур, предусмотренных исключительно в КСИ.

Таблица

Случаи применения КСИ в процедурах по ПП РФ № 2490 [22]

Table

Cases of applying the CIC in the procedures under RF GR No. 2490 [22]

№	Процедура по ПП РФ № 2490	% дублирования	% уникальности	% упущенных возможностей
I. Приобретение прав на земельный участок, в том числе предоставляемый из земель, находящихся в государственной или муниципальной собственности				
1	Предоставление земельного участка, находящегося в государственной или муниципальной собственности, в аренду или в собственность на торгах в соответствии с земельным законодательством	47	24	29
2	Предоставление земельного участка, находящегося в государственной или муниципальной собственности, без проведения торгов в соответствии с земельным законодательством	62	17	21
3	Принятие решения об установлении публичного сервитута, заключение соглашения об установлении публичного сервитута, сервитута в соответствии с гражданским законодательством, земельным законодательством, внесение изменений в такое соглашение	31	46	23
4	Выдача в соответствии с земельным законодательством разрешения на использование земель или земельных участков, находящихся в государственной или муниципальной собственности, без предоставления земельных участков и установления сервитута, публичного сервитута	75	25	0
II. Утверждение или выдача необходимых для выполнения инженерных изысканий, архитектурно-строительного проектирования, строительства, реконструкции объекта капитального строительства, сведений, документов, материалов				
1	Подготовка и утверждение документации по планировке территории. Принятие решения о подготовке проекта планировки территории, проекта межевания территории	63	14	23
2	Предоставление разрешения на условно разрешенный вид использования земельного участка, в том числе проведение общественных обсуждений или публичных слушаний по проекту решения о предоставлении такого разрешения	0	100	0
3	Предоставление разрешения на отклонение от предельных параметров разрешенного строительства, реконструкции объекта капитального строительства, в том числе проведение общественных обсуждений или публичных слушаний по проекту решения о предоставлении такого разрешения	100	0	0
4	Выдача градостроительного плана земельного участка	50	50	0
5	Получение технических требований и условий, подлежащих обязательному исполнению при архитектурно-строительном проектировании в целях реконструкции, капитального ремонта существующих линейных объектов, в том числе сетей инженерно-технического обеспечения, в соответствии со статьей 52.2 Градостроительного кодекса Российской Федерации	90	10	0
6	Заключение договора с правообладателями существующих линейных объектов, в том числе сетей инженерно-технического обеспечения, в целях их реконструкции, капитального ремонта в соответствии со статьей 52.2 Градостроительного кодекса Российской Федерации	100	0	0
7	Получение предусмотренных частью 3 статьи 52.1 Градостроительного кодекса Российской Федерации технических условий на подключение (технологическое присоединение) объектов капитального строительства к сетям инженерно-технического обеспечения	79	14	7

Таблица. Продолжение
Table. Continuation

№	Процедура по ПП РФ № 2490	% дублирования	% уникальности	% упущенных возможностей
8	Заключение указанных в статье 52.1 Градостроительного кодекса Российской Федерации договоров о подключении (технологическом присоединении) объектов капитального строительства к сетям инженерно-технического обеспечения (наименование в редакции, введенной в действие с 12 августа 2022 года постановлением Правительства Российской Федерации от 28 июля 2022 года № 1348, см. предыдущую редакцию)	60	21	19
9	Принятие в соответствии с земельным законодательством решения об установлении, изменении, прекращении существования зон с особыми условиями использования территории в связи со строительством, реконструкцией объекта капитального строительства	49	34	17
III. Выполнение инженерных изысканий и осуществление архитектурно-строительного проектирования				
1	Проведение экспертизы проектной документации объектов капитального строительства и (или) результатов инженерных изысканий	64	23	13
2	Проведение государственной историко-культурной экспертизы проектной документации на проведение работ по сохранению объектов культурного наследия в случае, предусмотренном частью 6 статьи 49 Градостроительного кодекса Российской Федерации	60	10	30
3	Проведение государственной экологической экспертизы проектной документации в случаях, предусмотренных частью 6 статьи 49 Градостроительного кодекса Российской Федерации	69	8	23
IV. Строительство, реконструкция объекта капитального строительства, ввод в эксплуатацию объекта капитального строительства				
1	Выдача разрешения на строительство (за исключением случаев, если для строительства объекта капитального строительства не требуется выдача разрешения на строительство), внесение изменений в разрешение на строительство, присвоение адреса объекту адресации	58	24	18
2	Направление уведомления о соответствии указанных в уведомлении о планируемом строительстве параметров объекта индивидуального жилищного строительства или садового дома установленным параметрам и допустимости размещения объекта индивидуального жилищного строительства или садового дома на земельном участке	40	0	60
3	Направление в уполномоченные на осуществление государственного строительного надзора федеральный орган исполнительной власти, орган исполнительной власти субъекта Российской Федерации или Государственную корпорацию по атомной энергии «Росатом» извещений, предусмотренных Градостроительным кодексом Российской Федерации	68	0	32
4	Подписание актов о подключении (технологическом присоединении) объекта капитального строительства к сетям инженерно-технического обеспечения	50	14	36
5	Предоставление органом федерального государственного энергетического надзора временного разрешения, разрешения на допуск в эксплуатацию объектов по производству электрической энергии, объектов электросетевого хозяйства, энергопринимающих установок, объектов теплоснабжения и теплопотребляющих установок	34	53	13
6	Заключение договоров энергоснабжения (купли-продажи (поставки) электрической энергии), договоров горячего водоснабжения, договоров холодного водоснабжения, договоров теплоснабжения, договоров водоотведения, в том числе в отношении строящегося, реконструируемого объекта на период его строительства, реконструкции, а также заключение договоров поставки газа	47	31	22

Таблица. Продолжение
Table. Continuation

№	Процедура по ПП РФ № 2490	% дублирования	% уникальности	% упущенных возможностей
7	Выдача заключения о соответствии построенного, реконструированного объекта капитального строительства требованиям проектной документации (в случае, если предусмотрено осуществление государственного строительного надзора в соответствии с частью 1 статьи 54 Градостроительного кодекса Российской Федерации)	100	0	0
8	Подготовка технического плана здания, сооружения в соответствии с Федеральным законом «О государственной регистрации недвижимости»	0	0	100
9	Выдача разрешения на ввод объекта капитального строительства в эксплуатацию, внесение изменений в разрешение на ввод объекта капитального строительства в эксплуатацию (в предусмотренных Градостроительным кодексом Российской Федерации случаях)	37	63	0
10	Направление уведомления о соответствии построенного, реконструированного объекта индивидуального жилищного строительства или садового дома требованиям законодательства о градостроительной деятельности либо несоответствии построенного, реконструированного объекта индивидуального жилищного строительства или садового дома требованиям законодательства о градостроительной деятельности	50	0	50
V. Государственный кадастровый учет, государственная регистрация прав на объект капитального строительства (помещения, машино-места)				
1	Государственный кадастровый учет, государственная регистрация прав на объект капитального строительства (помещения, машино-места)	86	0	14

- 2. Перечень потребностей в рамках обязательных процедур, предусмотренных в КСИ и других классификаторах.
- 3. Перечень потребностей в рамках обязательных процедур, не предусмотренных в КСИ.

Выводы

Проведенный анализ показал, что доля дублирования классификаторов в процессе классификации потребностей, составленных по ПП РФ № 2490 [22], составляет 56,38 % (380 из 674 потребностей в целом), при этом доля упущенных потребностей составляет 20,33 % (см. рис.). Столь высокий процент дублирований приводит к выводу, что ведение КСИ в существующем виде приводит к существенным трудозатратам без достижения полезного эффекта. Представляется разумным ограничить область ответственности самостоятельного классификатора (название которого, вероятно, следует уточнить) теми позициями, где он несет самостоятельную ценность (для 24 % потребностей в рамках обязательных процедур).

Представленные научные результаты получены в рамках работы «Разработка научно-обоснованного подхода к модернизации структуры и принципов формирования Классификатора строительной информации», выполненной за счет средств финансирования Фонда поддержки и развития науки АО «НИЦ «Строительство».



Рис. Распределение случаев применения КСИ в процедурах по ПП РФ № 2490
Fig. Distribution of cases with the CIC applied in the procedures under RF GR No. 2490

Список литературы

1. Постановление Правительства Российской Федерации от 12 сентября 2020 №1416 «Об утверждении Правил формирования и ведения классификатора строительной информации» [интернет]. Режим доступа: <http://government.ru/docs/all/129805/>
2. Приказ Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ от 6 августа 2020 г. № 430/пр «Об утверждении структуры и состава классификатора строительной информации» [интернет]. Режим доступа: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74480634/>.
3. Классификатор строительной информации [интернет]. Режим доступа: <http://ksi.faufcc.ru> (дата доступа 22.08.2024).
4. Приказ Минстроя России от 30 декабря 2016 г. № 1038/пр «Об утверждении сметных нормативов» [интернет]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.ru/docs/13419/>
5. Государственные элементные сметные нормы [интернет]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/view.state-gesn.php> (дата доступа 22.08.2024).
6. Постановление Госстандарта РФ от 26.12.1994 № 367 (ред. от 19.06.2012) «О принятии и введении в действие Общероссийского классификатора профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов ОК 016–94» [вместе с «ОК 016–94. Общероссийский классификатор профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов»] (дата введения 01.01.1996) [интернет]. Режим доступа: <https://bazanpa.ru/gosstandart-rossii-postanovlenie-n367-ot26121994-h938919/>.
7. Общероссийский классификатор профессий рабочих, должностей служащих и тарифных разрядов [интернет]. Режим доступа: <http://okpdr.ru/> (дата доступа 22.08.2024).
8. Приказ Росстандарта от 12 декабря 2014 г. № 2020-ст (ред. от 18.02.2021) «О принятии и введении в действие Общероссийского классификатора занятий (ОКЗ) ОК 010–2014 (МСКЗ–08)» [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=249639>
9. Общероссийский классификатор занятий [интернет]. Режим доступа: <https://classifikators.ru/okz> (дата доступа 22.08.2024).
10. Московская строительная система классификаторов [интернет]. Режим доступа: <https://exp.mos.ru/project-office-for-implementation-of-bim/mssk/> (дата доступа 22.08.2024).
11. Приказ Минстроя России от 17 ноября 2022 г. № 969/пр «О формировании классификатора строительных ресурсов» [интернет]. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/232535/>.
12. Классификатор строительных ресурсов [интернет]. Режим доступа: <https://fgiscs.minstroyrf.ru/ksr/> (дата доступа 22.08.2024).
13. Постановление Госкомстата РФ от 26 декабря 1994 № 366 «ОК 015–94 (МК 002–97). Общероссийский классификатор единиц измерения» [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/ok-015-94-obshcherossiiskii-klassifikator-edinitz-izmerenija-utv/>.

14. Общероссийский классификатор единиц измерения [интернет]. Режим доступа: <https://classifikators.ru/okei>.
15. Постановление Правительства Москвы от 30 марта 1999 № 249-ПП Об утверждении структуры Московского территориального строительного каталога (части II–VI) [интернет]. Режим доступа: https://businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_69942.html.
16. Постановление Правительства Москвы от 26 октября 1999 № 981-ПП Об утверждении структуры части I Московского территориального строительного каталога [интернет]. Режим доступа: https://businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_68084.html.
17. Московский территориальный строительный каталог [интернет]. Режим доступа: <https://mtsk.mos.ru/> (дата доступа 22.08.2024).
18. Постановление Госстандарта России от 30 марта 1999 № 97 (ред. от 22.09.2023) «О принятии и введении в действие Общероссийских классификаторов» [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-gosstandarta-rf-ot-30031999-n-97/>.
19. Общероссийский классификатор форм собственности [интернет]. Режим доступа: <https://classifikators.ru/okfs> (дата доступа 22.08.2024).
20. Приказ Росстандарта от 31.01.2014 № 14-ст. «О принятии и введении в действие Общероссийского классификатора видов экономической деятельности (ОКВЭД2) ОК 029–2014 (КДЕС Ред. 2) и Общероссийского классификатора продукции по видам экономической деятельности (ОКПД2) ОК 034–2014 (КПЕС 2008)» [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=241621>.
21. Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии. Общероссийский классификатор продукции по видам экономической деятельности. ОК 034–2014 (КПЕС 2008) [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=490997>.
22. Постановление Правительства Российской Федерации от 25 декабря 2021 № 2490 «Об утверждении исчерпывающего перечня документов, сведений, материалов, согласований, предусмотренных нормативными правовыми актами Российской Федерации и необходимых для выполнения предусмотренных частями 3–7 статьи 5.2 Градостроительного кодекса Российской Федерации мероприятий при реализации проекта по строительству объекта капитального строительства, и признании утратившими силу некоторых актов и отдельных положений некоторых актов Правительства Российской Федерации» [интернет]. Режим доступа: <https://base.garant.ru/403332935/#friends>.

References

1. Resolution of the Government of the Russian Federation of September 12, 2020 No. 1416 “On approval of the Rules for the formation and maintenance of the construction information classifier” [internet]. Available at: <http://government.ru/docs/all/129805/>. (In Russian).
2. Order of the Ministry of Construction of Russia No. 430/pr “On approval of the structure and composition of the construction information classifier” [internet]. Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/74480634/>. (In Russian).
3. Construction information classifier [internet]. Available at: <http://ksi.faufcc.ru> (accessed 22 August 2024). (In Russian).
4. Order of the Ministry of Construction of Russia dated December 30, 2016 No. 1038/pr “On approval of estimate standards” [internet]. Available at: <https://www.minstroyrf.ru/docs/13419/>. (In Russian).
5. State elemental estimate standards [internet]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/trades/view.state-gesn.php> (accessed 22 August 2024). (In Russian).
6. Resolution of the State Standard of the Russian Federation of 26.12.1994 No. 367 (as amended on 19.06.2012) “On the adoption and implementation of the All-Russian classifier of workers’ professions, employee positions and wage grades ОК 016-94” [internet]. Available at: <https://bazanpa.ru/gosstandart-rossii-postanovlenie-n367-ot26121994-h938919/>. (In Russian).
7. All-Russian classifier of workers’ professions, employee positions and wage grades [internet]. Available at: <http://okpdtr.ru/> (accessed 22 August 2024). (In Russian).

8. Order of Rosstandart dated December 12, 2014 No. 2020-st (as amended on 18.02.2021) "On the adoption and implementation of the All-Russian Classifier of Occupations (OKZ) OK 010-2014 (ISCO-08)" [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=249639>. (In Russian).
9. All-Russian Classifier of Occupations [internet]. Available at: <https://classifikators.ru/okz> (accessed 22 August 2024). (In Russian).
10. Moscow Construction Classifier System [internet]. Available at: <https://exp.mos.ru/project-office-for-implementation-of-bim/mssk/>. (In Russian).
11. Order of the Ministry of Construction of Russia dated November 17, 2022 No. 969/pr "On the formation of the classifier of construction resources" [internet]. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/232535/>. (In Russian).
12. Classifier of construction resources [internet]. Available at: <https://fgiscs.minstroyrf.ru/ksr/> (accessed 22 August 2024). (In Russian).
13. Resolution of the State Statistics Committee of the Russian Federation dated December 26, 1994 No. 366 "OK 015-94 (MK 002-97). All-Russian classifier of units of measurement" [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/ok-015-94-obshcherossiiskii-klassifikator-edinits-izmerenija-utv/>. (In Russian).
14. All-Russian Classifier of Units of Measurement [internet]. Available at: <https://classifikators.ru/okei>. (In Russian).
15. Resolution of the Moscow Government of March 30, 1999 No. 249-PP On Approval of the Structure of the Moscow Territorial Construction Catalog (Parts II–VI) [internet]. Available at: https://businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_69942.html. (In Russian).
16. Resolution of the Moscow Government of October 26, 1999 No. 981-PP On Approval of the Structure of Part I of the Moscow Territorial Construction Catalog [internet]. Available at: https://businesspravo.ru/Docum/DocumShow_DocumID_68084.html. (In Russian).
17. Moscow Territorial Construction Catalog [internet]. Available at: <https://mtsk.mos.ru/> (accessed 22 August 2024). (In Russian).
18. Resolution of the State Standard of Russia of March 30, 1999 No. 97 (as amended on 09/22/2023) "On the Adoption and Implementation of All-Russian Classifiers" [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/postanovlenie-gosstandarta-rf-ot-30031999-n-97/>. (In Russian).
19. All-Russian Classifier of Ownership Forms [internet]. Available at: <https://classifikators.ru/okfs> (accessed 22 August 2024). (In Russian).
20. Order of Rosstandart dated 31.01.2014 No. 14-st. "On the adoption and implementation of the All-Russian Classifier of Economic Activities (OKVED2) OK 029-2014 (KDES Rev. 2) and the All-Russian Classifier of Products by Type of Economic Activity (OKPD2) OK 034-2014 (KPES 2008)" [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=241621>. (In Russian).
21. All-Russian Classifier of Products by Type of Economic Activity. OK 034-2014 (KPES 2008) [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=490997>. (In Russian).
22. Resolution of the Government of the Russian Federation of December 25, 2021 No. 2490 "On approval of an exhaustive list of documents, information, materials, approvals provided for by regulatory legal acts of the Russian Federation and necessary for the implementation of the measures provided for in Parts 3–7 of Article 5.2 of the Urban Development Code of the Russian Federation when implementing a project for the construction of a capital construction project, and recognizing as invalid certain acts and individual provisions of certain acts of the Government of the Russian Federation" [internet]. Available at: <https://base.garant.ru/403332935/#friends>. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Анатольевич Волков, д-р техн. наук, старший научный сотрудник, АО «НИЦ «Строительство», Москва; профессор, Институт архитектуры, Харбинский политехнический университет, Харбин
Andrey A. Volkov, Dr. Sci. (Engineering), Senior Researcher, JSC Research Center of Construction, Moscow; Professor, School of Architecture, Harbin Institute of Technology, Harbin

Павел Дмитриевич Челышков[✉], д-р техн. наук, руководитель центра информационного моделирования ДНТПИЭ, АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: chelyshkovpd@cstroy.ru
Pavel D. Chelyshkov[✉], Dr. Sci. (Engineering), Head, Information Modeling Center, Unit of Scientific and Technical Projects and Inspection, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: chelyshkovpd@cstroy.ru

Алексей Евгеньевич Давыдов, канд. техн. наук, научный сотрудник центра информационного моделирования ДНТПИЭ, АО «НИЦ «Строительство», Москва
Alexey E. Davydov, Cand. Sci. (Engineering), Researcher, Information Modeling Center, Unit of Scientific and Technical Projects and Inspection, JSC Research Center of Construction, Moscow

Артем Александрович Никитенко, эксперт центра информационного моделирования ДНТПИЭ, АО «НИЦ «Строительство», Москва
Artem A. Nikitenko, Expert, Information Modeling Center, Unit of Scientific and Technical Projects and Inspection, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

ТЕХНОЛОГИИ ИИ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ ЦИФРОВЫХ МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ТЕРРИТОРИЙ

С.А. КУДИНОВ^{1,✉}

М.Б. ЗАЙЧУК²

¹ Университет ИТМО, Биржевая линия, д. 14, г. Санкт-Петербург, 199034, Российская Федерация

² ООО «Рокет Групп», Каменноостровский проспект, д. 26–28, г. Санкт-Петербург, 197101, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Рынок жилищного строительства России, несмотря на нестабильную экономическую ситуацию, показывает рекордный рост. На этом фоне особую актуальность приобретает не только скорость разработки проектов развития территорий, но и точность, обоснованность принимаемых решений. Активное развитие и внедрение в строительную сферу технологий искусственного интеллекта открывает возможности для эффективного реагирования на сложившиеся вызовы через автоматизацию создания оптимальных цифровых моделей развития территорий, которые учитывают множество факторов, нормативных и экономических параметров.

Материалы и методы. Статья посвящена разработанному многоступенчатому методу генерации цифровых моделей территорий для жилищного девелопмента, включающему цепочку алгоритмов с применением ИИ, в том числе алгоритмы генерации линейных и площадных объектов, а также алгоритм генерации оптимального функционального зонирования территории. Это позволяет решать задачи по созданию улично-дорожной сети, определению функционального назначения образованных кварталов, а также размещения в них объектов капитального строительства и сопутствующей инфраструктуры.

Результаты. Экспериментальные исследования в части применения разработанного метода генерации продемонстрировали сокращение трудоемкости выполнения концептуального проектирования в 200 раз в сравнении с классическим подходом, что обеспечивает сверхоперативное и точное создание концепций, многократно ускоряет работу специалистов при разработке комплексных проектов. Метод прошел успешную апробацию и имплементирован в цифровую ИИ-платформу территориального информационного моделирования rTİM.

Обсуждение. Дальнейшие исследования в области оптимизации алгоритмов имеют потенциал расширения сферы применения технологии ИИ, что позволит решать задачи развития не только в проектах многоквартирной жилой застройки, но и в других сферах строительной отрасли.

Ключевые слова: искусственный интеллект, генеративный дизайн, геоинформационные системы, системы автоматизированного проектирования, САПР, информационное моделирование зданий, территориальное информационное моделирование, цифровая модель, градостроительная концепция

Для цитирования: Кудинов С.А., Зайчук М.Б. Технологии ИИ для генерации цифровых моделей развития территорий. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2025;44(1):159–169. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-159-169](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-159-169)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.12.2024

Поступила после рецензирования 03.02.2025

Принята к публикации 06.02.2025

AI TECHNOLOGIES FOR GENERATING DIGITAL MODELS OF TERRITORIAL DEVELOPMENT

S.A. KUDINOV¹✉

M.B. ZAICHUK²

¹ ITMO University, Birzhevaya Line, 14, St. Petersburg, 199034, Russian Federation

² Rocket Group LLC, Kamennostrovsky pr., 26-28, St. Petersburg, 197101, Russian Federation

Abstract

Introduction. Despite the unstable economic situation, the Russian housing construction market is showing record growth. Therefore, the accuracy and validity of the taken decisions become as relevant as the rate of territorial project development. Active development and implementation of artificial intelligence technologies in construction open up opportunities for an effective response to current challenges by automating digital models for the development of territories, taking into account many factors, as well as regulatory and economic parameters.

Materials and methods. The article examines the developed multi-stage method for generating digital models of territories for housing development. The method uses a chain of AI algorithms, including for generating linear and area objects, as well as optimal functional zoning of the territory. This solves problems related to the design of street and road networks and determination of the functional purpose for the formed quarters including capital construction facilities and related infrastructure.

Results. Experimental studies on the application of the developed generation method have demonstrated a 200-fold reduction in the labor intensity of conceptual design compared to the classical approach. This ensures the ultra-fast and accurate development of concepts and greatly accelerates the work on complex projects. The method has been successfully tested and implemented in the rTIM digital AI platform for territorial information modeling.

Conclusions. Further research in the field of algorithm optimization has the potential to expand the scope of application for AI technologies to solve development problems in both multi-apartment residential projects and other areas of the construction industry.

Keywords: artificial intelligence, generative design, geographic information systems, computer-aided design systems, CAD, building information modeling, territorial information modeling, digital model, urban planning concept

For citation: Kudinov S.A., Zaichuk M.B. AI technologies for generating digital models of territorial development. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2025;44(1):159–169. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1\(44\)-159-169](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2025-1(44)-159-169)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.12.2024

Revised 03.02.2025

Accepted 06.02.2025

Введение

Объем жилищного строительства в России за последние несколько лет стал рекордным за всю историю страны. Рост рынка подтверждается увеличением вывода застройщиками новых проектов на фоне высокого покупательского спроса [1]. Одной из важных целей развития строительной отрасли в России является увеличение объема жилья до ежегодного показателя 120 млн м² к 2030 году [2]. В условиях нестабильной экономической ситуации и неустойчивого спроса задача принятия точных, эффективных и оперативных решений о развитии урбанизированных территорий обретает особую актуальность. Оперативная разработка гибких, адаптивных мастер-планов, концепций и проектов развития территорий, отвечающих потребностям рынка и современным стандартам качества среды, невозможна без применения цифровых решений и интеллектуальных технологий.

Так же как в конце XX века, системы автоматизированного проектирования (САПР) перевели разработку чертежей с бумаги в электронный вид, появилось трехмерное моделирование и базовые инструменты автоматизации, уже в начале XXI века технологии информационного моделирования зданий (BIM) позволили вывести проектирование на новый уровень, представив его как стадию жизненного цикла объекта, на которой его материальное создание предваряет разработка цифрового двойника, описывающего физические и функциональные характеристики, систематизированные параметры и атрибуты [3]. Следующая ступень эволюции в этой области – становление технологий информационного моделирования городов. Масштабные информационные модели территорий (ТИМ) представляют собой не просто объединение множества BIM-моделей. Они должны описывать в комплексе и объекты с инфраструктурной точки зрения, механизмы управления и активности людей – пользователей территорий, таким образом упрощая анализ и мониторинг урбанизированной среды и обеспечивая мультидисциплинарную поддержку принятия решений при развитии территорий [4].

Технологии генеративного дизайна не просто создают возможности для разработки таких моделей, но и открывают путь для сверхоперативного решения задач управления и принятия решений о развитии территорий путем построения цифровых моделей урбанизированных территорий с точностью, не уступающей проектам, разработанным профильными специалистами при помощи классических инструментов.

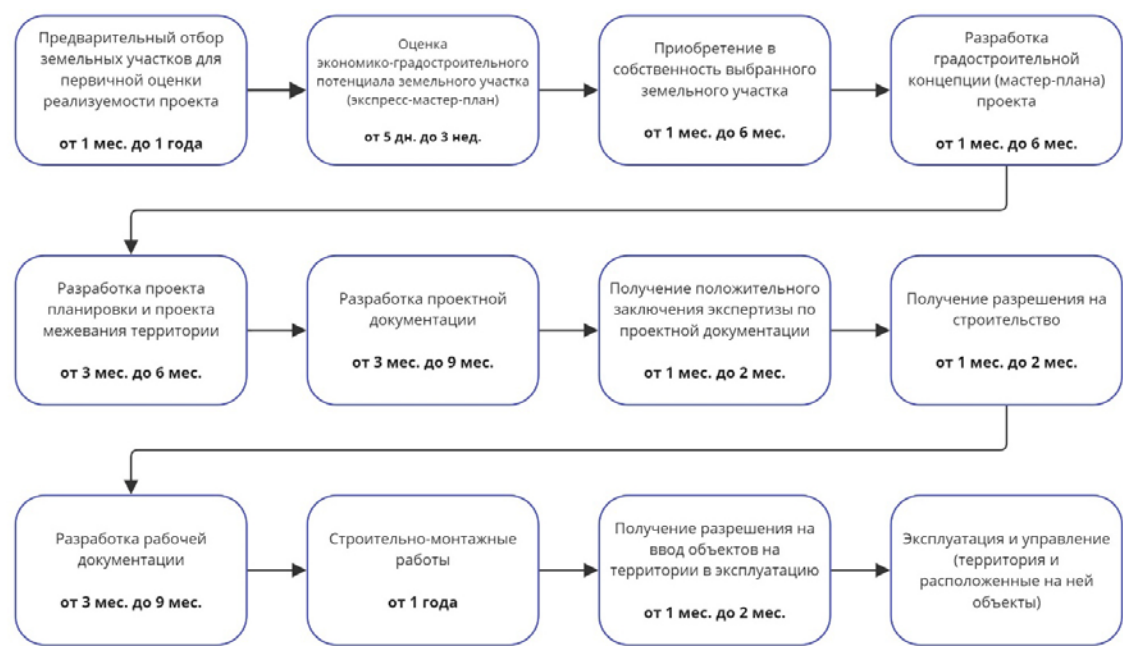


Рис. 1. Схема этапов процесса девелопмента территорий
Fig. 1. Scheme of territorial development stages

Обзор подходов к планированию развития территорий

Девелопмент представляет собой длительный процесс вовлечения земель населенных пунктов в хозяйственный оборот и состоит из множества этапов, среди которых поиск оптимального земельного участка, разработка градостроительной концепции, проекта планировки и межевания, а также реализация и последующая эксплуатация территории. Данный процесс (рис. 1) регулируется законодательством посредством нормативных правовых документов [5].

Классический подход к подготовке проекта

Традиционный подход в разработке концепций развития территорий предполагает наличие в проектной команде сотрудников с разной специализацией: архитекторы, специалисты генплана, инженеры наружных сетей, транспортные специалисты и др.

Работа над проектом начинается со сбора исходных данных о земельном участке и окружении, планировочных ограничениях, предельных параметрах застройки. Как правило, на этапе оценки экономико-градостроительного потенциала территории командой проекта разрабатывается не более трех сценариев, отличающихся по планировочной структуре, а также технико-экономическим показателям (ТЭП). Один из сценариев становится основой для более детальной проработки проекта на этапе градостроительной концепции (мастер-плана), а также для проекта планировки территории.

Применение цифровых инструментов

Применение САПР и иных цифровых инструментов существенно ускоряет разработку проектов на всех стадиях: от сбора данных и их обработки до непосредственно проектирования, аналитики и визуализации результатов.

Применение технологий информационного моделирования позволяет создавать цифровые модели и двойники территории еще на этапе планирования. Они опираются на спецификацию сущностей, описывающих свойства объектов урбанизированной территории, допустимые и недопустимые операции с ними [6]. Цифровые модели концепций развития территорий – комплексные сущности, описывающие планировочные решения и параметрические характеристики градостроительного каркаса и объектов капитального строительства на территории.

Несмотря на существенную экономию трудовых ресурсов за счет внедрения таких инструментов автоматизации, разработка проектов по-прежнему ведется в соответствии с классическим подходом, то есть силами команды разноплановых специалистов с выполнением рутинных задач ручного цифрового черчения или объемного моделирования. Главный недостаток этого подхода заключается в невозможности просчета большого количества сценариев для сравнительного выбора наилучшего.

Внедрение интеллектуальных технологий

Стремительное развитие в 2020-х годах технологий искусственного интеллекта (ИИ) открыло возможности для нового уровня автоматизации проектирования. Технологии ИИ применяются при анализе больших данных, моделировании процессов и непосредственном автоматическом создании проектов (генеративном дизайне) [7]. С одной стороны, ИИ способен на порядок ускорять и упрощать работу с данными и создание проектных решений, с другой стороны, в сфере строительства и проектирования важное условие применимости ИИ – достоверная точность и строгое соответствие результата нормативным требованиям, а это могут обеспечить не все технологии. К примеру, отличительная особенность больших языковых моделей или графических нейросетей – создание правдоподобного, но не гарантированно достоверного результата. Новые интеллектуальные технологии в проектировании должны рассматриваться как основа для эффективных инструментов в руках квалифицированного специалиста, обеспечивающего экспертную верификацию решений, но не как автономные роботы-проектировщики.

Метод и алгоритмы генеративного дизайна цифровых моделей

Разработанный многоступенчатый метод генерации цифровой модели территории (рис. 2) включает в себя блоки импорта данных, несколько последовательно и параллельно выполняющихся алгоритмов генерации различных элементов цифровой модели, а также блоки экспорта и передачи результатов генерации для визуализации.

Алгоритмы генерации для комплексных проектов охватывают задачи создания улично-дорожной сети, определения оптимального функционального зонирования образованных кварталов, размещения в них объектов капитального строительства, а также генерации сопутствующей инфраструктуры. Применяемые алгоритмы обеспечивают точность результата и строгое соответствие заданным граничным параметрам.

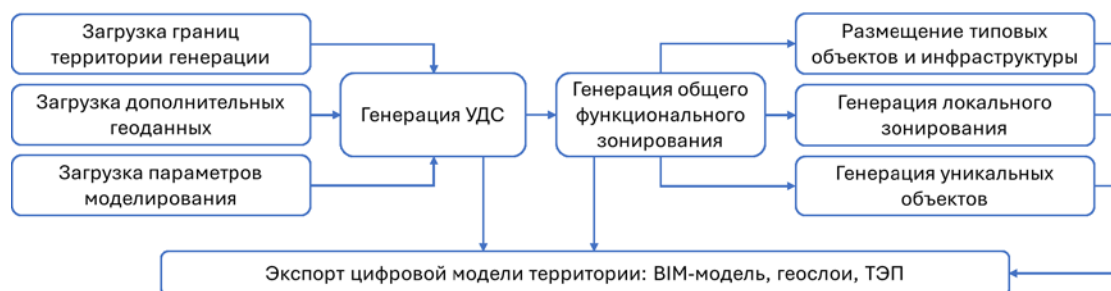


Рис. 2. Схема метода генерации цифровой модели территории
Fig. 2. Scheme of the method for generating the digital model of the territory

Сбор и обработка исходных данных

Исходными данными для выполнения генерации являются границы территории, дополнительные пространственные данные (например, каркас улично-дорожной сети (УДС), зоны с особыми условиями, объекты окружения) и набор управляющих параметров и настроек (нормативные и другие целевые значения).

Пространственные исходные данные могут быть получены из документов территориального планирования или из открытых источников, в том числе с использованием автоматизированных инструментов. Значения для параметрических наборов данных собираются из нормативов градостроительного проектирования, иных нормативных и корпоративных стандартов.

Генерация линейных объектов и сетей

Генерация цифровой модели территории начинается с выполнения алгоритма трассировки улично-дорожной сети. Один из предлагаемых в методе алгоритмов основан на *L*-системах (система Линденмайера) [8]. В ходе генерации алгоритм разбивает территорию на квартал и задает свойства сегментам УДС, например категорию улицы, количество полос дороги.

В *L*-системе для старта процесса «роста» ветвей-сегментов УДС требуется задание стартовых точек присоединения на границе территории генерации. Общий паттерн УДС задается глобальной целью: стремление к центру участка и следование в сторону других точек подключения для связи их максимально прямым путем. Применяются также определенные правила ветвления и локальные ограничения к сегментам. После завершения работы алгоритма генерации применяется постгенеративная оптимизация для исключения кварталов некорректной геометрии.

Генерация трассировки иных линейных объектов выполняется при помощи алгоритма A^* , для работы которого применяется навигационный граф с динамической или регулярной сеткой. После работы алгоритма A^* выполняется постобработка генерируемых путей для обеспечения геометрически корректной трассировки.

Генерация оптимального функционального зонирования

Границы кварталов передаются на вход алгоритму генерации оптимального функционального зонирования. Задача этого алгоритма – определить такие функции или виды разрешенного использования (ВРИ) для каждого квартала, чтобы застройка всего проекта не нарушала нормативных требований, в том числе показателей доступности и обеспеченности социальной инфраструктуры. Кварталам присваиваются теги, которые могут служить

инструкциями для алгоритма выбора функционального назначения, например определенное расположение, геометрия и т. п.

Выбор функционального назначения кварталов может производиться несколькими алгоритмами ИИ. Например, генетическим алгоритмом, который на старте начинает пробовать присваивать кварталам разные виды назначения и считать общую «стоимость» результата [9]. Целью алгоритма (поиска оптимума) является минимизация функции; жилые и коммерческие кварталы снижают ее значение, а социальная инфраструктура повышает. Конкретные коэффициенты влияния различных объектов выбираются в ходе калибровки градостроительной модели.

Альтернативой является алгоритм машинного обучения, способный на основе анализа существующих проектов генерировать схожие планировки. В качестве обучающей выборки используются размеченные цифровые модели эталонных проектов, включающие все объекты инфраструктуры на территории проекта и его окружения. Для каждого объекта рассчитываются расстояния-признаки. На основе анализа данных выделяется набор зон, содержащих такие типы объектов, которые в рассматриваемых проектах чаще всего встречались вместе и в схожих местах. При генерации зонирования на новой территории накладывается сетка, для каждой точки которой один из алгоритмов – деревья принятия решений, опорные векторы, логистическая регрессия или KNN – определяет, какую зону по набору расстояний до точки нужно назначить в заданной точке.

Позиционирование и параметрическая генерация площадных объектов

В зависимости от целевой градостроительной модели в некоторых видах кварталов могут размещаться предварительно смоделированные типовые здания, а также может выполняться генерация уникальной геометрии жилых комплексов или коммерческих зданий. В случае применения модели периметральной застройки алгоритм образует сплошной фронт застройки по периметру квартала, а также генерирует прямые, Г-образные или П-образные комплексы в границах квартала произвольной формы, ориентированные вдоль одной или нескольких улиц, окружающих квартал.

После генерации геометрии зданий им проставляются унифицированные теги, описывающие ТЭП конкретных объектов, например площадь, электропотребление, количество жителей и т. п.

Объекты притяжения на сгенерированной территории могут связываться пешеходными путями, оптимизация трассировки которых может выполняться специальными алгоритмами, такими как AntRoadPlanner, для предотвращения появления стихийных троп [10].

Экспорт и визуализация цифровой модели

После завершения работы основных алгоритмов генерации могут выполняться дополнительные расчетно-аналитические алгоритмы на данных полученной цифровой модели. Например, может быть рассчитана инсоляция для всех жилых зданий, сгенерирована квартирография, сформирован план-график и экономическая модель реализации проекта.

Пространственные результаты генерации (УДС, зонирование, объекты капитального строительства) могут быть экспортированы в виде геослоев (например, в формате GeoJSON в координатной системе WGS-84) для работы в сторонних геоинформационных системах или инженерном программном обеспечении. Объекты капитального строительства могут

быть экспортированы в BIM-модель в виде файлов в формате *.IFC (международный стандарт для импорта и экспорта объектов зданий и их параметров). ТЭП результата генерации могут быть выгружены в табличном виде для дальнейшей работы в форматах *.DOCX или *.XLSX.

На основе результатов генерации может осуществляться интерактивная объемная визуализация цифровых моделей концепций развития территории при помощи специализированного программного обеспечения.

Экспериментальные исследования

Описанный метод генеративного дизайна цифровых моделей градостроительных концепций успешно апробирован и имплементирован в цифровую ИИ-платформу территориального информационного моделирования гГИМ. Платформа позволяет производить сверхоперативную оценку экономико-градостроительного потенциала территорий разного масштаба, а также разрабатывать полноценные градостроительные концепции.

Для экспериментальных исследований были выбраны два проекта комплексного развития территорий (КРТ), для которых концепции были выполнены архитекторами классическим методом и методом, разработанным с применением ИИ. Разработанный метод и алгоритмы запускались в платформе гГИМ с базовой градостроительной моделью, описывающей стандарт КРТ Минстроя России [11].

Сравнение показателей эффективности методов для проекта в г. Биробиджане (площадь участка 42,8 га) приведено в табл. 1.

Сравнение показателей эффективности методов для проекта в с. Новосергиевка (площадь участка 56,4 га) приведено в табл. 2.

Примеры визуализации сгенерированных в платформе гГИМ цифровых моделей представлены на рис. 3.

Таким образом, метод генерации на основе алгоритмов ИИ продемонстрировал сокращение трудоемкости выполнения концептуального проектирования (в пересчете на 1 рассчитанный сценарий) в 200 раз относительно классического подхода, достигая при этом более высоких технико-экономических показателей за счет эффективности алгоритмов и большой вариативности результатов.

Заключение

Разработанный метод генерации цифровых моделей территорий с применением алгоритмов искусственного интеллекта позволяет многократно повысить эффективность процесса разработки градостроительных концепций. Он обеспечивает оптимизацию трудовых ресурсов, избавляя специалистов от рутинных процессов и сокращая сроки проектирования, а ответственным лицам позволяет принимать более взвешенные и обоснованные решения о развитии территорий на основе различных сгенерированных сценариев.

Дальнейшие исследования в области оптимизации алгоритмов имеют потенциал создания более детализированных цифровых моделей проектов, а также расширения сферы применения технологии, что, в свою очередь, позволит решать задачи развития не только в проектах многоквартирной жилой застройки, но и в области малоэтажного строительства, промышленно-логистических комплексов и других сферах строительной отрасли.

Таблица 1

Сравнение методов для территории в г. Биробиджане

Table 1

Comparison of methods for the territory in Birobidzhan

№ п/п	Наименование показателя	Классическое проектирование	Проектирование на основе ИИ
1	Площадь территории, га	42,8	
2	Срок проектирования, раб. дней	5	1
3	Количество затраченных трудочасов, ч	60	8
4	Трудоемкость (трудочасов на 1 сценарий)	60	0,27
5	Количество специалистов, чел.	3	1
6	Количество сценариев проекта, шт.	1	30
7	Максимальная площадь жилого фонда в проекте, м ²	240 000	258 000

Таблица 2

Сравнение методов для территории в с. Новосергиевка

Table 2

Comparison of methods for the territory in v. Novosergievka

№ п/п	Наименование показателя	Классическое проектирование	Проектирование на основе ИИ
1	Площадь территории, га	56,4	
2	Срок проектирования, раб. дней	8	2
3	Количество затраченных трудочасов, ч	192	16
4	Трудоемкость (трудочасов на 1 сценарий)	192	1,07
5	Количество специалистов, чел.	4	1
6	Количество сценариев проекта, шт.	1	15
7	Максимальная площадь жилого фонда в проекте, м ²	327 000	368 000



а (a)



б (b)

Рис. 3. Визуализация сгенерированных цифровых моделей: а – г. Биробиджан; б – с. Новосергиевка
Fig. 3. Visualization of generated digital models: а – Birobidzhan; b – v. Novosergievka

Список литературы

1. ДОМ.РФ. Обзор многоквартирного жилищного строительства в Российской Федерации. II квартал 2024 года [интернет]. Режим доступа: https://rusbonds.ru/rb-docs/analytics/DomRuComment_2024_08_16_7pcuq8xhw2gg2nk46wwxaja52sropcf0.pdf.
2. Правительство Российской Федерации. Стратегия развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года [интернет]. Режим доступа: <http://static.government.ru/media/files/AdmXczBBUGfGNM8tz16r7RkQcsgP3LAm.pdf>.
3. Olanrewaju O.I., Kineber A.F., Chileshe N., Edwards D.J. Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle. *Building and Environment*. 2022;207:108556. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108556>
4. Dantas H.S., Sousa J.M.M.S., Melo H.C. The Importance of City Information Modeling (CIM) for Cities' Sustainability. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019;225:012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012074>
5. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29.12.2004 № 190-ФЗ (ред. от 08.08.2024) (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.09.2024). Консультант Плюс [интернет]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/. (дата доступа 23.09.2024).
6. Qamar T., Bawany N.Z., Amber S., Javed S. Smart City Services Ontology (SCSO): Semantic Modeling of Smart City Applications. In: 2019 Seventh International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC). Trabzon, Turkey; 2019, pp. 52–56. <https://doi.org/10.1109/icdipc.2019.8723785>
7. Schneider S., Fischer J.R., König R. Rethinking automated layout design: developing a creative evolutionary design method for the layout problems in architecture and urban design. In: Gero J.S. (eds). *Design Computing and Cognition '10*. Springer, Dordrecht; 2011, pp. 367–386. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0510-4_20
8. Muller P. Procedural modeling of cities. In: *ACM SIGGRAPH 2006 Courses (SIGGRAPH '06)*. New York; 2006, pp. 139–184. <https://doi.org/10.1145/1185657.1185716>
9. Haupt R.L., Haupt S.E. *Practical Genetic Algorithms*. Second Edition ed. John Wiley & Sons, Inc.; 2003. <https://doi.org/10.1002/0471671746>
10. Kudinov S., Smirnov E., Malyshev G., Khodnenko I. Planning Optimal Path Networks Using Dynamic Behavioral Modeling. In: *Lecture Notes in Computer Science* Springer, Cham: Springer Nature; 2018, pp. 129–141. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93701-4_10
11. Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ. Стандарт комплексного развития территорий. Кн. 1: Свод принципов комплексного развития территорий. Москва: КБ Стрелка; 2017.

References

1. DOM.RF. Overview of Multi-Apartment Housing Construction in the Russian Federation in the Second Quarter of 2024 [internet]. Available at: https://rusbonds.ru/rb-docs/analytics/DomRuComment_2024_08_16_7pcuq8xhw2gg2nk46wwxaja52sropcf0.pdf. (In Russian).
2. Government of the Russian Federation, Strategy for the Development of the Construction Industry and Housing and Public Utilities of the Russian Federation for the Period up to 2030 with a Forecast up to 2035 [internet]. Available at: <http://static.government.ru/media/files/AdmXczBBUGfGNM8tz16r7RkQcsgP3LAm.pdf>. (In Russian).
3. Olanrewaju O.I., Kineber A.F., Chileshe N., Edwards D.J. Modelling the relationship between Building Information Modelling (BIM) implementation barriers, usage and awareness on building project lifecycle. *Building and Environment*. 2022;207:108556. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2021.108556>
4. Dantas H.S., Sousa J.M.M.S., Melo H.C. The Importance of City Information Modeling (CIM) for Cities' Sustainability. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2019;225:012074. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/225/1/012074>
5. Urban Planning Code of the Russian Federation of 29.12.2004 No. 190-FZ (as amended on 08.08.2024) (as amended and supplemented, entered into force on 01.09.2024). Consultant Plus [internet]. Available: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (accessed 23 September 2024). (In Russian).

6. *Qamar T., Bawany N.Z., Amber S., Javed S.* Smart City Services Ontology (SCSO): Semantic Modeling of Smart City Applications. In: 2019 Seventh International Conference on Digital Information Processing and Communications (ICDIPC). Trabzon, Turkey; 2019, pp. 52–56. <https://doi.org/10.1109/icdipc.2019.8723785>
7. *Schneider S., Fischer J.R., König R.* Rethinking automated layout design: developing a creative evolutionary design method for the layout problems in architecture and urban design. In: *Gero J.S.* (eds). Design Computing and Cognition '10. Springer, Dordrecht; 2011, pp. 367–386. https://doi.org/10.1007/978-94-007-0510-4_20
8. *Muller P.* Procedural modeling of cities. In: ACM SIGGRAPH 2006 Courses (SIGGRAPH '06). New York; 2006, pp. 139–184. <https://doi.org/10.1145/1185657.1185716>
9. *Haupt R.L., Haupt S.E.* Practical Genetic Algorithms. Second Edition ed. John Wiley & Sons, Inc.; 2003. <https://doi.org/10.1002/0471671746>
10. *Kudinov S., Smirnov E., Malyshev G., Khodnenko I.* Planning Optimal Path Networks Using Dynamic Behavioral Modeling. In: Lecture Notes in Computer Science Springer, Cham: Springer Nature; 2018, pp. 129–141. https://doi.org/10.1007/978-3-319-93701-4_10
11. Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation. Standard of integrated development of territories. Book 1: A set of principles for integrated development of territories. Moscow: KB Strelka; 2017. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Александрович Кудин[✉], научный сотрудник, руководитель лаборатории «Интеллектуальные технологии городского планирования», Университет ИТМО, Санкт-Петербург
e-mail: lab01@mail.ru

Sergei A. Kudinov[✉], Researcher, Laboratory Head, Laboratory of Intelligent Technologies in Urban Planning, ITMO University, St. Petersburg
e-mail: lab01@mail.ru

Михаил Борисович Зайчук, руководитель архитектурной группы, ООО «Рокет Групп», Санкт-Петербург
Mikhail B. Zaichuk, Head of the Architectural Group, Rocket Group LLC, St. Petersburg

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН»

Журнал «Бетон и железобетон» – научно-техническое рецензируемое издание для профессионалов-строителей, архитекторов, инженеров, проектировщиков, всех работников строительного комплекса, а также для индивидуальных застройщиков. Издается с 1955 г. В журнале публикуются материалы о новых конструктивных и планировочных решениях, прогрессивных строительных материалах, о теплосберегающих технологиях и конструкциях, об экономике жилищно-гражданского строительства, проблемах архитектуры, градостроительства, сельского строительства, экологии жилища.

Учредитель: Ассоциация «Железобетон».

Издатель: АО «НИЦ «Строительство».

Журнал включен в перечень ВАК с 10.06.2024 г. по научным специальностям:

2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);

2.1.5 – Строительные материалы и изделия (технические науки).

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС 77-76959 от 09.10.2019. Свидетельство о регистрации средства массовой информации Эл № ФС77-86552 от 26.12.2023.

Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN (International Standard Serial Number): печатное – 0005-9889, сетевое – 3034-1302.

Журнал издается на платформе Elpub Национального консорциума российских библиотек (НЭИКОН). Входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе eLIBRARY.ru.

Основан: Институт НИИЖБ Госстроя СССР и ВНИИжелезобетон Минстройматериалов СССР.

Тираж печатного издания – 300 экземпляров.

Периодическое печатное издание (6 раз в год).

Подробная информация на сайте **bzhb.ru**

Подписной индекс ООО «АРЗИ» – **85502**.



*Приглашаем к сотрудничеству
ученых, аспирантов,
исследователей!*

Адрес редакции: г. Москва, 2-я Институтская ул.,
дом 6, корпус 1

Тел. редакции: +7(495)602-00-70 доб. 1022, 1023

Выпускающий редактор – Починина Наталья

e-mail: pochininane@estroy.ru



АО «НИЦ «Строительство» —
это более чем 95-летний опыт исследований
и достижений в области строительной науки.

Мы — команда единомышленников,
способных реализовать сложнейшие
инженерные проекты.

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



ниц строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИИ В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИИ А.А. ПРОСВЕТА



НИИОСП
ИИ Н.М. ПЕРЕКОВА



г. Москва,
2-я Институтская ул., д. 6



+7 (499) 174-73-84 | +7 (499) 174-73-80



www.cstroy.ru



motorina@cstroy.ru | smirnova@cstroy.ru



ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ

ИЗЫСКАНИЯ

СТРОИТЕЛЬСТВО



повысить квалификацию
специалистов и экспертов



пройти обучение в аспирантуре



подготовить диссертацию в докторантуре



защитить диссертацию на соискание ученой
степени **кандидата наук**, на соискание ученой
степени **доктора наук**

Учебный центр
АО «НИЦ «Строительство»
приглашает вас:





АО «НИЦ «Строительство» проводит подготовку специалистов на курсах повышения квалификации по очной и заочной формам:

- — в области инженерных изысканий
- — в области проектирования
- — в области строительства
- — по уникальным программам АО «НИЦ «Строительство»
- — разработка индивидуальных программ обучения и учебно-тематических планов



Преподавательский состав Учебного центра

- — лекции читают академики, действующие члены и члены-корреспонденты РААСН, лауреаты Премий Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники РФ, доктора и кандидаты технических наук
- — учебный класс рассчитан на обучение до 75 человек одновременно. Оснащен системой кондиционирования и видеонаблюдения



Набор в аспирантуру и докторантуру АО «НИЦ «Строительство» проводится по направлению **08.06.01 «Техника и технология строительства»** по направлениям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»

ФОРМЫ ПОДГОТОВКИ ДИССЕРТАЦИИ В АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



Обучение в аспирантуре,
докторантуре

Прикрепление для
подготовки диссертации без
освоения образовательных
программ



В АО «НИЦ «Строительство» работает совет по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Защита диссертаций проводится по следующим 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»

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»
Вып. 1(44) 2025

Редактор выпуска: Починина Н.Е.
Компьютерная верстка: Чорненький С.И.

Дата выхода в свет: 15.05.2025 г. Формат 70×100/16
Бумага мелованная. Офсетная печать.
Тираж 500 экз. Заказ № 20162

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Триада»
170034, Российская Федерация,
г. Тверь, пр. Чайковского, д. 9, оф. 514.
тел.: +7 910 647-49-85
e-mail: triadatver@yandex.ru
Свободная цена



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ISSN: 2224-9494 (Print)

ISSN: 2782-3938 (Online)

Подписной индекс: 36569

АО «НИЦ «Строительство»

Москва, 2024