



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



НИЦ ИС
ИИИДА КИЧЕРЕНКО



НИЦ ИС
ИИИДА ТВОЗДЕВА



НИЦ ИС
ИИИДА ПЕРСВАНОВА

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

№ 2(41) 2024

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ





НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 2(41) 2024

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. 2(41) 2024

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
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. Герсегонова
АО «НИЦ «Строительство»,
Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Вестник НИЦ «Строительство»
Научный потенциал строительной отрасли
Вып. 2[41] / под ред. А.И. Звездова. –
М.: АО «НИЦ «Строительство», 2024. – 162 с.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI журнала: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI выпуска: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\[41\]](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2[41])
В действующем Перечне ВАК от 10.06.2024 г.
под номером 606.

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», 2024

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
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
(NIIZHB) named after A.A. Gvozdev,
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

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

TAMRAZYAN 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

**Bulletin of Science and Research Center of Construction
Scientific potential of the construction industry**
Issue 2(41) / edited by A.I. Zvezdov. –
M.: JSC Research Center of Construction, 2024. – 162 p.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI journal <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI issue [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41))
**In the current version of List of HAC from June 10, 2024
our journal has a number 606.**

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, 2024

Содержание

Строительные конструкции, здания и сооружения

Барагунова Л.А., Шогенова М.М., Шогенов О.М., Жирикова И.А.

Свободные и вынужденные колебания балок под действием распределенной нагрузки 7

Белаш Т.А., Сафин Р.Р.

Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них 18

Ванин И.В., Арискин М.В.

Применение резьбовых шайб в соединениях деревянных конструкций 29

Гукова М.И., Фарфель М.И., Кондрашов Д.В.

Установка порталов в местах выбивки колонн при переоборудовании цехов
ОАО «Тагмет» 40

Зенин С.А.

Влияние петлевых стыков арматуры на прочность внецентренно сжатых
железобетонных конструкций 61

Колесников Н.В., Арискин М.В., Мартышкин Д.О., Меркушов А.В.

Совершенствование расчетов соединений анизотропных конструкционных материалов ... 69

Кулагин А.В.

Вариативность оценки прочности и жесткости для непрофильных балочных
конструкций 79

Пущев Д.И., Мишина С.Ю., Ткачев Е.А., Грошев Ю.М.

Обоснование противопожарных мероприятий в помещении блочного щита
управления АЭС с применением полевого моделирования пожара 87

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Брыксин В.В.

Особенности деформирования модели гибкой подпорной стенки и грунта засыпки.
Эксперимент в лабораторных условиях 103

Строительные материалы и изделия

Кузнецова И.С., Зубова Я.В.

Влияние вида заполнителей на прочностные и деформативные свойства
высокопрочных бетонов при нагреве 118

Соколова С.В., Сидоренко Ю.В.

Получение эффективных материалов на основе отходов сернокислотной
промышленности 131

Управление жизненным циклом объектов строительства

Лосев Д.М.

Цифровые технологии дистанционного управления и контроля при производстве
строительных работ 148

Contents

Building constructions, buildings and structures

Baragunova L.A., Shogenova M.M., Shogenov O.M., Zhirikova I.A. Free and forced vibrations of beams under distributed load.....	7
Belash T.A., Safin R.R. Wind load simulation for the analysis of the antenna dual-purpose poles aerodynamics	18
Vanin I.V., Ariskin M.V. Use of threaded washers in the joints of wooden structures	29
Gukova M.I., Farfel M.I., Kondrashov D.V. Installation of portals in the sections of the column demolition during the re-equipment of Tagmet JSC workshops.....	40
Zenin S.A. Effect of loop reinforcement joints on the strength of eccentrically compressed reinforced concrete structures.....	61
Kolesnikov N.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Merkushov A.V. Improved calculations of joints in anisotropic structural materials.....	69
Kulagin A.V. Variability of strength and stiffness assessment for non-profile beam structures	79
Putsev D.I., Mishina S.Yu., Tkachev E.A., Groshev Yu.M. Justification of fire protection measures in the NPP control room using CFD fire modeling	87

Foundations, underground structures

Bryksin V.V. Experimental research of a flexible retaining wall model in laboratory conditions	103
--	-----

Building materials and products

Kuznetsova I.S., Zubova I.V. Effect of aggregate type on strength and deformation properties of high-strength concrete during heating.....	118
Sokolova S.V., Sidorenko Yu.V. Production of effective materials on the basis of sulfuric acid industry wastes.....	131

Lifecycle management of construction projects

Losev D.M. Digital technologies for remote control and monitoring of construction works	148
---	-----

УДК 534.1

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-7-17)

EDN: BRFAUI

СВОБОДНЫЕ И ВЫНУЖДЕННЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛОК ПОД ДЕЙСТВИЕМ РАСПРЕДЕЛЕННОЙ НАГРУЗКИ

Л.А. БАРАГУНОВА✉

М.М. ШОГЕНОВА, канд. ф.-м. наук

О.М. ШОГЕНОВ, канд. техн. наук

И.А. ЖИРИКОВА

Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, ул. Чернышевского, д. 173, г. Нальчик, 360004, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Многолетний опыт проектирования и эксплуатации сооружений показывает, что для обеспечения их надежности недостаточно проведения только расчетов на прочность. Кроме обеспечения прочности и жесткости сооружений к ним часто предъявляются требования по учету влияния колебаний. Данные типы расчетов являются сложными, так как должно быть учтено большое количество самых различных факторов. В настоящее время сооружения все больше усложняются, и большое внимание уделяется расчетам на сейсмические воздействия на здания, что весьма актуально для районов строительства, где сейсмичность повышена. В инженерных сооружениях возникает повышенная напряженность, которая обуславливается этими и другими причинами. Свободные и вынужденные колебания различных упругих конструкций представляют несомненный возрастающий интерес и имеют обширную библиографию.

Цель настоящей статьи состоит в постановке полной математической задачи для двух наиболее распространенных способов закрепления концов балки, в определении спектров собственных частот и форм колебаний.

Материалы и методы. Рассматривается балка переменного сечения из однородного материала под действием поперечной распределенной нагрузки, которая совершает изгибные колебания. Свободные и вынужденные колебания описываются дифференциальными уравнениями. Сначала решается однородное уравнение, затем – неоднородное. Применен принцип Даламбера. Использован метод разделения переменных. Выполнены тестовые проверки.

Результаты. Получено дифференциальное уравнение в частных производных четвертого порядка с постоянными коэффициентами. Определены спектры собственных частот и форм колебаний. Высокая точность полученных результатов позволяет более коротким путем с наименьшим объемом вычислений определять характеристики свободных и вынужденных колебаний балок. Обнаружен интересный факт зависимости амплитуды и формы вынужденных колебаний стержней от близости частоты возмущений к собственным значениям и сдвига фаз компонентов векторного процесса возмущений.

Выводы. Выдвинуты гипотезы о существовании зависимости между коэффициентами затухания и линейно-вязкого трения материала, а также о постоянстве коэффициента затухания для всех собственных значений.

Ключевые слова: изгибные колебания, стержень переменного сечения, поперечная распределенная нагрузка, принцип Даламбера, уравнение четвертого порядка, спектры собственных частот, собственные функции колебаний, граничные условия, осевой момент инерции, модуль упругости, даламберова сила инерции

Для цитирования: Барагунова Л.А., Шогенова М.М., Шогенов О.М., Жирикова И.А. Свободные и вынужденные колебания балок под действием распределенной нагрузки. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):7–17. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-7-17)

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 02.04.2024

Поступила после рецензирования 19.04.2024

Принята к публикации 25.04.2024

FREE AND FORCED VIBRATIONS OF BEAMS UNDER DISTRIBUTED LOAD

L.A. BARAGUNOVA✉

M.M. SHOGENOVA, Cand. Sci. (Phys.-Math.)

O.M. SHOGENOV, Cand. Sci. (Engineering)

I.A. ZHIRIKOVA

Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Chernyshevskogo str., 173, Nalchik, 360004, Russian Federation

Abstract

Introduction. Many years of experience in design and operation of structures prove that the reliability of structures cannot be ensured by strength calculations alone. In addition to strength and stiffness of structures, their vibrations are often required to be considered. These types of calculations appear highly comprehensive, involving a large number of different factors to be taken into account. At present, as structures are becoming more and more complex, great attention is paid to seismic design, which is especially relevant for buildings subjected to high seismic loads. Engineering structures experience increased loads associated with the above-mentioned and other reasons. Free and forced vibrations of various elastic structures obtain a significant relevance among researchers as manifested by numerous publications on this issue.

Aim. To present a complete mathematical problem for the two most common methods of end restraint, to determine natural frequency spectrum and eigenforms of beam vibrations.

Materials and methods. The present study involves a beam of variable cross-section made of homogeneous material, subjected to transverse distributed load, which makes bending vibrations. Free and forced vibrations are described by differential equations. The homogeneous equation is solved first, then – the nonhomogeneous equation. The study involves application of D'Alembert's principle, variable separation method, and test checks.

Results. The authors obtained a fourth-order partial differential equation with constant coefficients and determined a natural frequency spectrum and eigenforms of vibrations. A high accuracy of the obtained results enables the characteristics of free and forced vibrations of beams to be determined in a shorter way with fewer calculations. Notably, the amplitude and eigenform of forced vibrations of beams appear dependent on the proximity of the disturbing frequency to the eigenvalues and the phase change of components in vector disturbance process.

Conclusions. The authors advanced hypotheses about a dependence between the damping and linear viscous friction coefficients as well as about the constancy of damping coefficient for all eigenvalues.

Keywords: bending vibrations, beam of variable cross-section, transverse distributed load, D'Alembert's principle, fourth-order equation, spectra of natural frequencies, eigenfunctions of vibrations, boundary conditions, axial moment of inertia, elastic modulus, D'Alembert force, inertial force

For citation: Baragunova L.A., Shogenova M.M., Shogenov O.M., Zhirikova I.A. Free and forced vibrations of beams under distributed load. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):7–17. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-7-17)

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 02.04.2024

Revised 19.04.2024

Accepted 25.04.2024

Постановка краевой задачи

Однородный стержень (рис. 1) длины l с погонной массой m , с осевым моментом инерции поперечного сечения J , из материала с модулем упругости E под действием поперечной распределенной нагрузки $q(x, t)$ совершает изгибные колебания, описываемые функцией $u(x, t)$.

Изучению вынужденных колебаний, как правило, предшествует решение задачи о свободных колебаниях [1, 2]. Математически это означает, что сначала решается однородное уравнение, затем – неоднородное. При свободных колебаниях поперечная нагрузка и другие возмущения отсутствуют, т. е. $f(x, t) \equiv 0$. Рассмотрим стержень переменного сечения из однородного материала, опирающийся по концам шарнирно (рис. 2). Такая задача имеет важное прикладное значение, так как она является базовой для всех других видов колебаний (вынужденных, кинематически возбуждаемых, параметрических и т. д.) [3–5].

Для вывода уравнения колебаний выделим элемент стержня длиной dx (рис. 3) и покажем все силы, приложенные к нему: M – изгибающий момент, Q – поперечная сила, dJ – даламберова сила инерции, dR – сила вязкого трения (демпфирования). Последние направлены

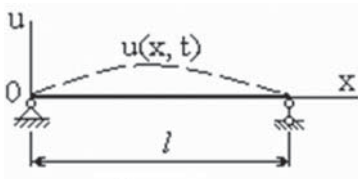


Рис. 1. Расчетная схема
Fig. 1. Design diagram

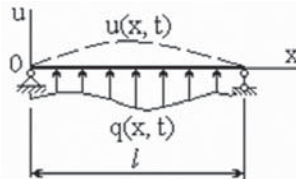


Рис. 2. Стержень под
распределенной нагрузкой
Fig. 2. Beam under distributed load

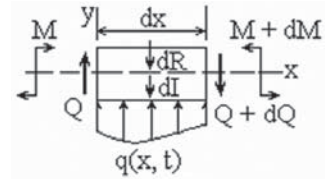


Рис. 3. Элемент стержня длиной dx
Fig. 3. Beam element with length dx

вниз, являются следствием движения со скоростью и ускорением, направленными вверх, вычисляются по формулам

$$dI = m\ddot{u}dx, \quad dR = \eta m\dot{u}dx. \quad (1)$$

Здесь $m = \rho S$;

ρ – плотность материала;

S – площадь поперечного сечения балки;

η – коэффициент демпфирования, точки над функциями означают дифференцирование по времени t .

По теории изгибных колебаний балок считается, что выделенный элемент стержня на рис. 3 принимается горизонтальным, а силы, приложенные к нему, – вертикальными.

Применяя принцип Даламбера, получим уравнение движения в виде равенства нулю суммы проекций всех сил на вертикальную ось

$$\sum_i Y_i = 0, \quad Q - Q - Q'dx + qdx - dI - dR = 0. \quad (2)$$

Штрихи в индексах соответствуют дифференцированию по x . Из курса сопротивления материалов известно, что

$$Q = M', \quad M = EJ u''. \quad (3)$$

В уравнении (2) сократим Q , учтем (1), (3) и получим

$$-M''dx + qdx - m\ddot{u}dx - \eta m\dot{u}dx = 0.$$

Далее простейшие преобразования дают уравнение

$$(EJu'')'' + m\ddot{u} + \eta m\dot{u} = q(x, t), \quad (4)$$

четвертого по переменной x , второго порядка по переменной t с переменными коэффициентами. При рассмотрении колебаний балки постоянного сечения из однородного материала уравнение (4) упрощается и приобретает вид уравнения в частных производных четвертого порядка, того же порядка, но с постоянными коэффициентами

$$EJu^{IV} + m\ddot{u} + \eta m\dot{u} = q(x, t), \quad u^{IV} + \gamma\ddot{u} + \varepsilon\dot{u} = f(x, t), \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty. \quad (5)$$

$$\gamma = m/EJ, \quad f(x, t) = q(x, t)/EJ.$$

Здесь и далее IV в верхнем индексе обозначает четвертую производную по x . Уравнение (4) является основным уравнением колебаний балки. К нему необходимо присоединить дополнительные краевые условия: начальные, граничные.

Далее будут рассматриваться установившиеся колебания балки при гармонических возмущениях, которым будут соответствовать периодические решения. Поэтому начальные условия не потребуются, а граничные условия будут зависеть от способов опирания концов стержня и действующих здесь возмущений.

Уравнения (4), (5) являются дифференциальными уравнениями четвертого порядка по переменной x . Поэтому необходимо присоединить четыре граничных условия: по два на каждом конце балки.

Нетрудно заметить, что возмущения подразделяются на кинематические и динамические. Кинематическими являются возмущения в виде перемещений: линейных, угловых. Динамические возмущения представляются распределенными нагрузками, сосредоточенными силами и парами сил с моментами.

Пример постановки полной математической задачи покажем на двух наиболее распространенных способах закрепления концов балки.

1) Шарнирно-опертая балка (рис. 4). Возмущениями, действующими на такую балку, являются распределенная нагрузка $q(x, t)$, вертикальные перемещения левого конца, моментная нагрузка, приложенная к шарниру левого конца, вертикальные перемещения правого конца, моментная нагрузка, приложенная к шарнирно-подвижному правому концу. Основное уравнение и граничные условия в совокупности образуют задачу

$$u^{IV} + a\ddot{u} + \varepsilon\dot{u} = f_1(x, t), \quad f_1(x, t) = -q(x, t)/EJ \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty. \quad (6)$$

$$u(0, t) = f_2(t), \quad EJ u''(0, t) = f_3(t), \quad u'(0, t) = f_3(t),$$

$$u(l, t) = f_4(t), \quad EJ u''(l, t) = f_5(t). \quad (7)$$

Знак минус в уравнении f_1 учитывает противоположность между принятым в данной задаче направлением распределенной нагрузки и ее положительным направлением.

2) Балка, «заделанная» на левом конце и шарнирно опертая на правом конце (рис. 4).

Возмущения, действующие на такую балку, будут такими же, как и в предыдущем примере, за исключением $f_3(t)$. Здесь $f_3(t)$ – угловые перемещения левого конца балки. Основное уравнение колебания балки (6) остается без изменения, но граничные условия для этой балки уже другие

$$u(0, t) = f_2(t), \quad u'(0, t) = f_3(t), \quad u(l, t) = f_4(t), \quad EJ u''(l, t) = f_5(t). \quad (8)$$

Заметим, что возмущения для обоих способов закрепления балки являются вектор-функцией с пятью компонентами.

$$\mathbf{f}(x, t) = \{f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t), f_5(t)\}. \quad (9)$$

Задача далее будет состоять в том, чтобы по заданной функции $\mathbf{f}(x, t)$ отыскать решение $u(x, t)$.

Дифференциальное уравнение с постоянными коэффициентами

Свободные колебания рассмотрим для способов закрепления балки, показанных на рис. 3 и 4, в той же очередности.

1) Шарнирно-опертая балка.

Для свободных колебаний задача (6), (7) принимает вид

$$u^{IV} + \gamma\ddot{u} + \varepsilon\dot{u} = 0, \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty. \quad (10)$$

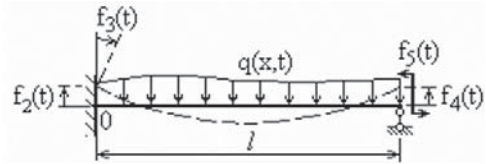


Рис. 4. Балка, «заделанная» на левом конце и опертая на правом конце

Fig. 4. Beam restrained on the left and supported on the right

$$u(0, t) = 0, \quad u''(0, t) = 0, \quad u(l, t) = 0, \quad u''(l, t) = 0. \quad (11)$$

Эти условия означают, что в процессе колебаний концы балки не перемещаются в вертикальном направлении, и, как следствие шарнирного опирания, изгибающие моменты в конечных сечениях являются нулевыми.

Далее задача состоит в определении спектров собственных частот и форм.

С целью применения метода разделения переменных запишем

$$u(x, t) = X(x)T(t). \quad (12)$$

Подставим (12) в (10) и получим

$$X^{IV}T + \gamma X\ddot{T} + \varepsilon X\dot{T} = 0,$$

разделим на произведение X и T и запишем результат

$$\frac{X^{IV}}{X} + \gamma \frac{\ddot{T}}{T} + \varepsilon \frac{\dot{T}}{T} = 0. \quad (13)$$

Первое слагаемое зависит от x , а остальные два – от t . Поэтому уравнение (13) может быть верным лишь при выполнении условия

$$-\frac{X^{IV}}{X} = \gamma \frac{\ddot{T}}{T} + \varepsilon \frac{\dot{T}}{T} = -\Lambda^4, \quad (14)$$

где Λ – некоторое число. Полученный результат содержит два уравнения. Рассмотрим второе равенство

$$-\frac{X^{IV}}{X} = -\Lambda^4, \quad \Rightarrow \quad X^{IV} - \Lambda^4 X = 0. \quad (15)$$

Подставляя (12) в (13), (14), находим граничные условия

$$X(0) = 0, \quad X''(0) = 0, \quad X(l) = 0, \quad X''(l) = 0. \quad (16)$$

Надо найти такое значение Λ , чтобы задача (15), (16) имела ненулевое решение. Это – задача Штурма – Лиувилля. Уравнение (15) имеет общее решение

$$X(x) = C_1 \sin \Lambda x + C_2 \cos \Lambda x + C_3 \operatorname{sh} \Lambda x + C_4 \operatorname{ch} \Lambda x. \quad (17)$$

Дважды дифференцируя, получим

$$X''(x) = \Lambda^2 (-C_1 \sin \Lambda x - C_2 \cos \Lambda x + C_3 \operatorname{sh} \Lambda x + C_4 \operatorname{ch} \Lambda x). \quad (18)$$

Первые два условия в (16) дают

$$C_2 + C_4 = 0, \quad -C_2 + C_4 = 0 \quad \Rightarrow \quad C_2 = C_4 = 0.$$

Тогда (17), (18) упрощаются

$$X(x) = C_1 \sin \Lambda x + C_3 \operatorname{sh} \Lambda x, \quad X''(x) = \Lambda^2 (-C_1 \sin \Lambda x + C_3 \operatorname{sh} \Lambda x).$$

С их учетом последние два условия в (16) принимают вид

$$C_1 \sin \Lambda l + C_3 \operatorname{sh} \Lambda l = 0, \quad -C_1 \sin \Lambda l + C_3 \operatorname{sh} \Lambda l = 0. \quad (19)$$

Приравниваем определитель системы уравнений к нулю, чтобы получить нетривиальное решение задачи, и приходим к трансцендентному уравнению

$$2 \sin \Lambda l \operatorname{sh} \Lambda l = 0. \quad (20)$$

Если $\operatorname{sh} \Lambda l = 0$, то $\Lambda l = 0 \Rightarrow X(x) = 0$.

Это решение тривиальное, и оно соответствует равновесному состоянию при отсутствии колебаний. Интерес представляют нетривиальные решения, соответствующие колебаниям. Поэтому приравниваем к нулю другой сомножитель в левой части (20)

$$\sin \Lambda l = 0 \Rightarrow \Lambda l = k\pi, \quad \Lambda = \Lambda_k = \frac{k\pi}{l}, \quad k \in \mathbb{N}. \quad (21)$$

Из (20)

$$\operatorname{sh} \Lambda l \neq 0, \quad \sin \Lambda l = 0 \Rightarrow C_3 = 0.$$

Окончательно для формы колебаний имеем

$$X(x) = C_1 \sin \Lambda_k x, \quad k = 1, 2, \dots$$

Без постоянного сомножителя эти функции представляют собой спектр собственных функций колебаний

$$\varphi_k(x) = \sin \Lambda_k x, \quad k = 1, 2, \dots \quad (22)$$

Обратимся к первому из уравнений (14) и запишем его в виде

$$\gamma \ddot{T} + \varepsilon \dot{T} + \Lambda_k^4 T = 0. \quad (23)$$

Его характеристическое уравнение

$$\gamma r^2 + \varepsilon r + \Lambda_k^4 = 0 \quad (24)$$

имеет корни

$$r_{1,2} = -\frac{\varepsilon}{2\gamma} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon}{2\gamma}\right)^2 - \frac{\Lambda_k^4}{\gamma}} = -\mu \pm \sqrt{\mu^2 - \left(\frac{k\pi a}{l}\right)^4},$$

$$\mu = \frac{\varepsilon}{2\gamma} = \frac{\eta}{2}, \quad a^4 = \frac{1}{\gamma} = \frac{EJ}{m} \Rightarrow a = \sqrt[4]{\frac{EJ}{m}}.$$

Обычно $\mu^2 < \Lambda_k^4$. Поэтому можно записать

$$r_{1,2} = -\mu \pm i \sqrt{\left(\frac{k\pi a}{l}\right)^4 - \mu^2} = -\mu \pm i \omega_{k\mu}.$$

Здесь обозначено

$$\omega_{k\mu} = \sqrt{\omega_{k0}^2 - \mu^2}, \quad \omega_{k0} = \left(\frac{k\pi a}{l} \right)^2, \quad k = 1, 2, \dots \quad (25)$$

Решения уравнения (23) имеют вид

$$T_k(t) = e^{-\mu t} (A_k \cos \omega_{k\mu} t + B_k \sin \omega_{k\mu} t), \quad k = 1, 2, \dots \quad (26)$$

В силу (26) формулы (25) определяют спектры собственных частот. Первая – при наличии сил трения, вторая – при их отсутствии.

Спектры собственных частот и форм могут быть найдены и другим, более легким способом [6–8]. С этой целью учтем затухающий характер свободных колебаний балки и запишем решение задачи (10), (11) в виде

$$u(x, t) = X(x) e^{rt}. \quad (27)$$

Здесь

$$r = -\mu + i\omega, \quad \mu > 0, \quad \omega > 0, \quad (28)$$

r – характеристический показатель;

μ и ω – подлежащие определению коэффициент затухания и частота свободных колебаний.

Подстановка (27) в (10), (11) дает

$$X^{IV} + (\gamma r^2 + \varepsilon r)X = 0, \quad X(0) = 0, \quad X(l) = 0. \quad (29)$$

Введем обозначение

$$d^4 = -\gamma r^2 - \varepsilon r \quad (30)$$

и перепишем задачу (29) в виде

$$X^{IV} - d^4 X = 0, \quad X(0) = 0, \quad X''(0) = 0, \quad X(l) = 0, \quad X''(l) = 0. \quad (31)$$

Задачи (15), (16) и (31) совпадают с точностью до обозначения коэффициентов Λ и d . Следовательно, по аналогии с (24) можно записать

$$d = d_k = \frac{k\pi}{l}, \quad k \in N. \quad \gamma r^2 + \varepsilon r + d^4 = 0.$$

Полученное уравнение совпадает с характеристическим уравнением (27), значит, мы пришли к тому же решению, но более коротким путем.

2) Балка, «заделанная» на левом конце и свободно опертая на правом.

Для такой балки при $f(t) \equiv 0$ задача принимает вид

$$u^{IV} + \gamma \ddot{u} + \varepsilon \dot{u} = 0, \quad x \in (0, l), \quad t > -\infty, \quad (32)$$

$$u(0, t) = 0, \quad u'(0, t) = 0, \quad u(l, t) = 0, \quad u''(l, t) = 0, \quad t > -\infty. \quad (33)$$

Повторение предыдущих выкладок приводит к новой системе уравнений относительно произвольных постоянных, из которой следует

$$C_2 = C_4 = 0, \quad C_1 \sin \Lambda l + C_3 \operatorname{sh} \Lambda l = 0, \quad C_1 \cos \Lambda l + C_3 \operatorname{ch} \Lambda l = 0.$$

Условие существования нетривиального решения этой системы дает уравнение частот

$$\operatorname{tg} \Lambda l = \operatorname{th} \Lambda l.$$

Это уравнение трансцендентное, решение можно получить только в приближенной форме. Следующая формула дает ненулевые корни этого уравнения с довольно большой точностью

$$\Lambda_k = \frac{\pi}{l} \left(k + \frac{1}{4} \right), \quad k \in \mathbb{N}.$$

При $k = 1$ погрешность составляет около 0,5 %, с увеличением k погрешность очень быстро стремится к нулю.

После повторения процедуры предыдущего примера получаем

$$\mu = \frac{\eta}{2}, \quad \omega_{\mu k} = \sqrt{\omega_{0k}^2 - \mu^2}, \quad k \in \mathbb{N}. \quad (34)$$

Здесь

$$\omega_{0k} = \Lambda_k^2 = \left(\frac{\pi a}{l} \right)^2 \left(k + \frac{1}{4} \right)^2$$

ω_{0k} – частоты свободных колебаний при отсутствии трения, $\omega_{\mu k}$ – то же при наличии трения.

Собственные функции колебаний, соответствующие каждой частоте, имеют вид

$$\varphi_k = \sin \Lambda_k (l - x) - \frac{\sin \Lambda_k l}{\operatorname{sh} \Lambda_k l} \operatorname{sh} \Lambda_k (l - x), \quad k \in \mathbb{N}. \quad (35)$$

Пример 1. Стальная балка изготовлена из двутавра № 14 длиной $l = 6$ м. Численные характеристики принятой балки: удельная плотность стали $\rho = 7800$ кг/м³, модуль упругости $E = 200$ ГПа, площадь поперечного сечения $S = 17,4$ см², момент инерции сечения $J = 572$ см⁴, $\eta = 1$ с⁻¹.

Определим первые три элемента спектров собственных значений и функций для рассмотренных двух случаев закрепления концов балки.

Погонная масса и коэффициент уравнения колебаний

$$m = \rho S = 7800 \times 17,4 \times 10^{-4} = 13,57 \text{ кг/м},$$

$$a = \sqrt[4]{\frac{EJ}{m}} = \sqrt[4]{\frac{200 \times 10^9 \times 572 \times 10^{-8}}{13,57}} = 17,04 \text{ мс}^{-1/2}.$$

Вычисления по формулам (25) и (34) дают спектры собственных значений: для шарнирно-опертой балки (значения в скобках при отсутствии трения)

$$\omega_{k\mu}(\omega_{k0}) = \{79,59 (79,60), 318,38 (318,38), 716,36 (716,36), \dots\} \text{ с}^{-1},$$

для балки с защемленным левым и шарнирно-опертым правым концом

$$\omega_{k\mu}(\omega_{k0}) = \{124,35 (124,36), 402,95 (402,95), 840,73 (840,73), \dots\} \text{ с}^{-1}.$$

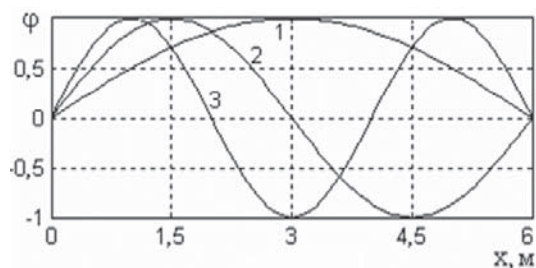


Рис. 5. Собственные функции колебаний
Fig. 5. Eigenfunctions of vibrations

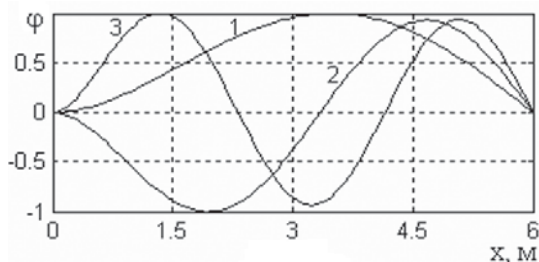


Рис. 6. Спектр собственных функций
Fig. 6. Spectrum of eigenfunctions

Элементы спектра собственных функций определяются по формулам (22) и (35).

Вычисления и графики, выполненные на компьютере, представлены кривыми на рис. 5 и 6. Номера кривых соответствуют коэффициентам k в формулах (9) и (10).

Список литературы

1. Бабаков И.М. Теория колебаний. Москва: Наука, глав. ред. физ.-мат. лит.; 1968.
2. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. Москва: Высшая школа; 1979.
3. Масленников А.М. Динамика и устойчивость сооружений. Москва: Издательство Юрайт; 2016.
4. Амосов А.А., Синицын С.Б. Основы теории сейсмостойкости сооружений. Москва: Издательство АСВ; 2001.
5. Амосов А.А., Синицын С.Б. Основы теории сейсмостойкости сооружений. Москва: Издательство АСВ; 2010.
6. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. Изд. 2-е. Москва: Физматлит; 2006.
7. Золотов А.Б., Акимов П.А., Сидоров В.Н. Математические методы в строительной механике (с основами теории обобщенных функций). Москва: Издательство АСВ; 2008.
8. Kulterbayev Kh.P., Shogenova M.M., Baragunova L.A. On the Influence of the Characteristic Frequency and Broadband of Seismic Effects on the Vertical Rod Oscillations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;753(3):042040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/4/042040>
9. Культербаев Х.П., Чеченов Т.Ю., Барагунов Т.М. Вынужденные колебания континуально-дискретной многопролетной балки при учете инерционных сил вращения. Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2012;(26):48–55.
10. Культербаев Х.П. Основы теории колебаний. Основы теории, задачи для домашних заданий, примеры решений. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова; 2003.

References

1. Babakov I.M. Theory of oscillations. Moscow: Nauka, The main editorial office of the physics and mathematics literature; 1968. (In Russian).
2. Biderman V.L. Applied theory of mechanical vibrations. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1979. (In Russian).
3. Maslennikov A.M. Dynamics and stability of structures. Moscow: Yurayt Publishing House; 2016. (In Russian).
4. Amosov A.A., Sinitsyn S.B. Fundamentals of the theory of seismic resistance of structures. Moscow: ASV Publ.; 2001. (In Russian).
5. Amosov A.A., Sinitsyn S.B. Fundamentals of the theory of seismic resistance of structures. Moscow: ASV Publ.; 2010. (In Russian).
6. Formalev V.F., Revisnikov D.L. Numerical methods. 2nd edition. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2006. (In Russian).
7. Zolotov A.B., Akimov P.A., Sidorov V.N. Mathematical methods in structural mechanics (with the basics of the theory of generalized functions). Moscow: ASV Publ.; 2008. (In Russian).

8. Kulterbayev Kh.P., Shogenova M.M., Baragunova L.A. On the Influence of the Characteristic Frequency and Broadband of Seismic Effects on the Vertical Rod Oscillations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;753(3):042040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/4/042040>
9. Kulterbaev H.P., Chechenov T.Yu., Baragunov T.M. Forced oscillations of a continually discrete multi-span beam taking into account inertial forces of rotation. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Construction and Architecture. 2012;(26):48–55. (In Russian).
10. Kulterbaev H.P. Fundamentals of the theory of oscillations. Fundamentals of theory, homework tasks, examples of solutions. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov; 2003. (In Russian).

Информация об авторах / Information about authors

Лялюся Адальбиевна Барагунова ✉, старший преподаватель кафедры строительных конструкций и механики, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик
e-mail: baragunoval@mail.ru
тел.: +7 (928) 075-62-99

Lyalusya A. Baragunova ✉, Senior Lecturer, Department of Engineering Structures and Mechanics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik
e-mail: baragunoval@mail.ru
tel.: +7 (928) 075-62-99

Марьяна Мухарбиевна Шогенова, канд. ф.-м. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций и механики, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик
e-mail: shogenova_mar@mail.ru
тел.: +7 (928) 710-50-45

Maryana M. Shogenova, Cand. Sci. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Engineering Structures and Mechanics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik
e-mail: shogenova_mar@mail.ru
tel.: +7 (928) 710-50-45

Олег Мухамедович Шогенов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры строительных конструкций и механики, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик
e-mail: shogenova_mar@mail.ru
тел.: +7 (928) 705-59-16

Oleg M. Shogenov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Engineering Structures and Mechanics, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik
e-mail: shogenova_mar@mail.ru
tel.: +7 (928) 705-59-16

Инна Аликовна Жирикова, старший преподаватель кафедры строительного производства, Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова, Нальчик
e-mail: innazh94@mail.ru
тел.: +7 (988) 720-22-16

Inna A. Zhirikova, Senior Lecturer, Department of Construction Production, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik
e-mail: innazh94@mail.ru
tel.: +7 (988) 720-22-16

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.97

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\[41\]-18-28](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2[41]-18-28)

EDN: CQQMAP

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕТРОВОЙ НАГРУЗКИ ДЛЯ АНАЛИЗА АЭРОДИНАМИКИ ОПОР ДВОЙНОГО НАЗНАЧЕНИЯ С АНТЕННАМИ, УСТАНОВЛЕННЫМИ НА НИХ

Т.А. БЕЛАШ¹, д-р техн. наук

Р.Р. САФИН^{1,2,✉}

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

²Группа компаний «Новые башни», ул. Маши Порываевой, д. 34, г. Москва, 107078, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Особенность опор двойного назначения в том, что помимо размещения на них оборудования оператора сотовой связи они выполняют функцию опоры освещения. Так как опоры двойного назначения расположены на центральных улицах города, конструкции имеют минимальные габариты и запасы по прочности. С каждым годом количество опор двойного назначения в городах растет, и правильный их расчет весьма актуален для обеспечения безопасной эксплуатации.

Цель: анализ изменения ветровой нагрузки на опору двойного назначения с установленными на ней панельными антеннами и влияние ее на прочность конструкции опоры.

Для реализации поставленной цели были сформулированы следующие задачи: определить зависимость аэродинамического коэффициента и величины ветровой нагрузки от размера панельных антенн и их расположения; сформулировать рекомендации по установке панельных антенн на верхней секции опоры двойного назначения диаметром 114 мм.

Материалы и методы. Рассматривается анализ изменения ветровой нагрузки и аэродинамического коэффициента конструкций секции опоры двойного назначения диаметром 114 мм с установленными на ней панельными антеннами в зависимости от размера антенн и их расположения.

Результаты. Установлено, что аэродинамический коэффициент уменьшается с увеличением вылета панельных антенн от трубостойки вне зависимости от их размера. Чем больше панельные антенны прижаты к трубостойке, тем ближе они находятся к соседним антеннам, тем самым затрудняя продувания сечения в центре. Несмотря на то что аэродинамический коэффициент уменьшается от увеличения вылета от трубостойки, величина ветровой нагрузки практически не меняется.

Выводы. При проектировании панельных антенн на трубостойке диаметром 114 мм необходимо руководствоваться размером сечения панельных антенн. Если ширина панельной антенны более 350 мм, а толщина более 150 мм, то рекомендуется проектировать установку таких панельных антенн как можно ближе к рассматриваемой трубостойке, чтобы уменьшить ветровую нагрузку на опору двойного назначения. В остальных случаях вылет панельных антенн не окажет существенного влияния на изменение ветровой нагрузки.

Ключевые слова: сооружения сотовой связи, антенно-мачтовые сооружения, мачты связи, опоры двойного назначения

Для цитирования: Белаш Т.А., Сафин Р.Р. Моделирование ветровой нагрузки для анализа аэродинамики опор двойного назначения с антеннами, установленными на них. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):18–28. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\[41\]-18-28](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2[41]-18-28)

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 27.02.2024

Поступила после рецензирования 19.03.2024

Принята к публикации 21.03.2024

WIND LOAD SIMULATION FOR THE ANALYSIS OF THE ANTENNA DUAL-PURPOSE POLES AERODYNAMICS

T.A. BELASH¹, Dr. Sci. (Engineering)

R.R. SAFIN^{1,2,✉}

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

² GC Novye bashni, Masha Poryvaeva str., 34, Moscow, 107078, Russian Federation

Abstract

Introduction. In addition to the location of cellular communication equipment, dual-purpose poles perform the function of a lighting pole. Since dual-purpose pole are located on the central streets of the city, they have strength margins and minimum dimensions. The growing number of urban dual-purpose poles makes the correct calculation very relevant for ensuring their safe operation.

Aim. Analysis of the change in the wind load on the dual-purpose pole with panel antennas and its effect on the strength of the dual-purpose pole structure. In order to achieve this, the following tasks were formulated: to determine the dependence of the aerodynamic coefficient and the magnitude of the wind load on the dimensions of panel antennas and their location; to formulate recommendations for the installation of panel antennas on the upper dual-purpose pole section with a diameter of 114 mm.

Materials and methods. An analysis of changes in the wind load and aerodynamic coefficient of the dual-purpose pole section, 114 mm in diameter, with panel antennas, installed thereon, depending on the dimensions of antennas and their location.

Results. The aerodynamic coefficient was established to decrease at an increase in the projection of the panel antennas beyond the pipe rack, regardless of their dimensions. The more the panel antennas are pressed against the pipe rack, the closer they are to the neighboring antennas, thereby making it difficult to blow the cross-section in the center. Despite the fact that the aerodynamic coefficient decreases with an increase in the projection beyond the pipe rack, the value of the wind load remains almost constant.

Conclusions. Panel antennas on a pipe rack with a diameter of 114 mm must be designed taking into account the cross-section dimensions of panel antennas. If the panel antenna width and thickness exceed 350 and 150 mm, respectively, the installation of such panel antennas should be as close as possible to the considered pipe rack in order to reduce the wind load on the dual-purpose pole. In other cases, the projection of panel antennas will have no significant effect on the change in the wind load.

Keywords: cellular communication structures, antenna mast structures, communication masts, dual-purpose poles

For citation: Belash T.A., Safin R.R. Wind load simulation for the analysis of the antenna dual-purpose poles aerodynamics. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):18–28. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-18-28](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-18-28)

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 27.02.2024

Revised 19.03.2024

Accepted 21.03.2024

Введение

В наши дни сотовая связь проникла практически во все сферы повседневной жизни. Она нам дает мобильность – главное свойство сегодняшней действительности. С учетом того, что рынок телекоммуникационных услуг находится в зрелой стадии развития, он продолжает испытывать значительные преобразования, связанные с более высокими требованиями современного общества. Начиная с 2012 года в России стали развиваться сети четвертого поколения (4G), без которых пользователи на сегодня не представляют комфортной жизни. Для организации правильной работы сетей 4G оборудование необходимо устанавливать на высоте 9–30 метров от уровня земли, а расстояние между базовыми станциями (комплекса радиооборудования, установленного на одной опоре) должно быть не более 500 метров, но в связи с ограничением мощности передачи данных из-за ограничения Роспотребнадзора расстояние между базовыми станциями необходимо уменьшать вдвое. Поэтому возникает необходимость формирования в крупных городах хорошо организованной инфраструктуры для размещения оборудования сотовой связи и обеспечения требуемой пропускной способности сети. В Москве для решения подобной задачи начали использовать инфраструктуру Моссвета, надстраивая существующие конструкции до необходимой высоты. Совмещение опор освещения и коммуникационного оборудования создало новый вид сооружения под названием опора двойного назначения (ОДН). В Москве насчитывают более 5 тыс. опор двойного назначения. Данный вид сооружения набирает популярность и в других городах России.

По данным компании «Новые башни», которая является лидером среди владельцев инфраструктуры для размещения оборудования сотовой связи, на башни и мачты отводится не более 10 % от общего числа строящихся коммуникационных сооружений. На 2022 год на балансе компании находится более 32 000 объектов.

С каждым годом сети операторов становятся все более чувствительными, и для уменьшения помех требуется уменьшать высоту подвеса оборудования и быть ближе к передатчику и приемнику. В наши дни в области развития сотовой связи более популярными сооружениями связи являются ОДН. Преимущества ОДН в том, что они занимают меньшую площадь земли, а фундаменты можно устроить между подземными коммуникациями.

Внешний вид ОДН показан на рис. 1 [1]. Данные конструкции могут изготавливаться из конической стальной оболочки, многогранной стальной оболочки либо из цилиндрических труб. Основная особенность опор в том, что помимо размещения на ней оборудования

оператора сотовой связи они выполняют функцию опоры освещения. ОДН отличаются от остальных столбов связи более высокой гибкостью и соответственно более высокими показателями по перемещениям. На сегодняшний день к ОДН предъявляют следующие требования:

- конструкции должны быть менее заметные;
- высота должна быть не более 30 и не менее 9 метров;
- фундаменты должны быть минимальными, так как работы проводятся в стесненных условиях городской застройки;
- кабели для подключения оборудования должны быть расположены внутри тела опоры.

Так как опоры двойного назначения расположены на центральных улицах города, оборудование оператора сотовой связи должно располагаться максимально компактно. Чем выше установлено оборудование, тем большая доля воздействия ветровой нагрузки на опору. Верхняя секция в большинстве конструктивов компании «Новые башни» выполнена из трубы диаметром 114 мм, поэтому анализ опоры с оборудованием, расположенным именно на этой секции, наиболее важен. В данной работе рассматривается анализ изменения ветровой нагрузки и аэродинамического коэффициента конструкций секции ОДН диаметром 114 мм с установленными на ней панельными антеннами в зависимости от размера антенн и их расположения относительно секции.

Среди всех типов антенн наиболее распространены панельные антенны. Они используются как секторные антенны, предназначенные для организации покрытия в заданной области. Именно через них излучается сигнал к мобильным станциям абонентов и принимается от них. Внешний вид панельных антенн показан на рис. 2 [2].

Цели

- Проанализировать изменение ветровой нагрузки на ОДН с установленными на ней панельными антеннами и влияние на прочность и устойчивость конструкции ОДН.
- Определить зависимость аэродинамического коэффициента от размера панельных антенн и их расположения относительно секции.
- Определить зависимость величины ветровой нагрузки от размера панельных антенн и их расположения относительно секций.
- Получить рекомендации по установке панельных антенн на верхней секции ОДН диаметром 114 мм.

Материалы и методы

Для решения поставленной задачи была использована программа SolidWorks, модуль Flow Simulation. SolidWorks – программный комплекс САПР для автоматизации работ промышленного предприятия на этапах конструкторской и технологической подготовки производства. Flow Simulation – семейство дополнительных модулей по газо- и гидродинамическим расчетам. Позволяет моделировать течение жидкостей и газов, управлять расчетной сеткой, использовать типовые физические модели жидкостей и газов, выполнять комплексный тепловой расчет, газо- и гидродинамические и тепловые модели технических устройств, нестационарный анализ, расчет вращающихся объектов [3].

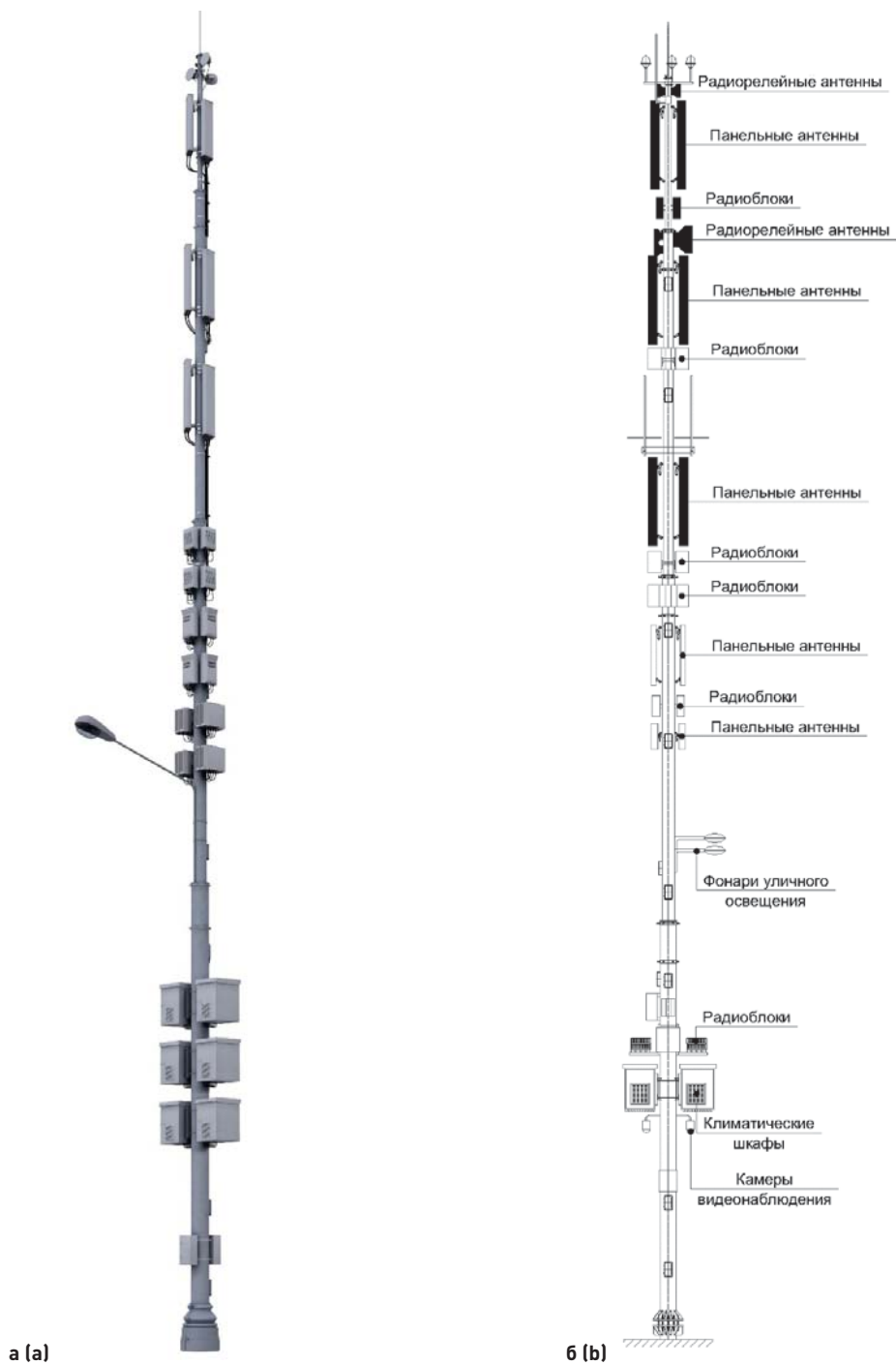


Рис. 1. Изображение опор двойного назначения (ОДН) (а) [1], схема оборудования (б)
Fig. 1. Image of a dual-purpose pole (DPP) (a) [1] and equipment scheme (b)



Рис. 2. Три панельные антенны на металлическом столбе на здании [2]

Fig. 2. Three panel antennas on a metal pole of the building [2]

В SolidWorks Flow Simulation ветровая нагрузка моделируется с использованием функции «внешние потоковые условия». В программе возможно задать скорость и направление ветра, а также выбрать модель турбулентности для более точного моделирования поведения воздушного потока. После настройки параметров ветра выполняется анализ воздушных потоков и получаются результаты, такие как распределение давления и силы на модель.

На первом этапе исследования была произведена верификация граничных условий виртуальной аэродинамической трубы. В качестве модели для верификации было принято прямоугольное сечение размерами 200×100 мм. Расчет аэродинамического коэффициента для такого сечения рассчитывается по Приложению В.1.13 [4]. Аэродинамические коэффициенты лобового сопротивления призматических сооружений определяются по формуле

$$c_x = k_\lambda \times c_{x\infty}.$$

Значение коэффициента k_λ в зависимости от относительного удлинения λ_e элемента определяется по Приложению В.1.15 [4]. В данной статье мы будем определять только $c_{x\infty}$, так как антенны могут быть разной длины, и учесть изменение возможно с помощью коэффициента, определенного по [4]. Значения коэффициента $c_{x\infty}$ для прямоугольных сечений приведены на рис. В.19 [4]. Для прямоугольного сечения размерами 200×100 мм аэродинамический коэффициент получается 2,2. На рис. 3 изображено получение данного результата. По оси абсцисс принято значение 0,5, что является отношением толщины прямоугольника к его ширине.

Для определения данного коэффициента с помощью программы SolidWorks были приняты следующие исходные данные:

Аэродинамический коэффициент определен по формуле 2 [5]:

$$c_{x\infty} = \frac{F}{0,5 \times \rho \times V^2 \times A}$$

где F – лобовое аэродинамическое сопротивление, Н;

A – площадь проекции тела поперек воздушного потока, м^2 ;

ρ – плотность воздуха, кг/м^3 (принята $1,2041 \text{ кг/м}^3$ при температуре 20°C);

V – скорость воздушного потока, м/с (принята 150 км/ч , или $41,67 \text{ м/с}$). Данная скорость ветра приведена в справочниках на антенны. Изменение скорости ветра в меньшую сторону незначительно влияет на аэродинамический коэффициент, в пределах 5 %, так как с уменьшением скорости ветра уменьшается и лобовое аэродинамическое сопротивление.

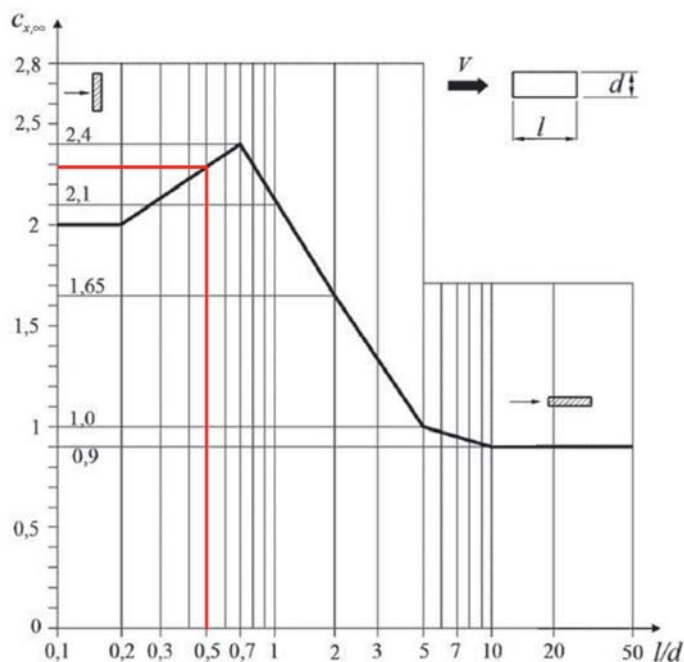


Рис. 3. График определения аэродинамического коэффициента для сечения 200×100 мм по рис. В.19 [4]
Fig. 3. Plot for determining the aerodynamic coefficient for a section of 200×100 mm according to Fig. В.19 [4]

Тип течения – ламинарное и турбулентное.

Шероховатость – 1 мм.

Тип расчетной области – двумерный, для определения $c_{x\infty}$.

Сетка выставлена автоматически.

Третий уровень адаптации сетки.

В результате расчета были получены следующие данные:

Среднее значение лобового аэродинамического сопротивления составляет 509 Н. Эпюра изменения скорости ветрового потока показана на рис. 4. Аэродинамический коэффициент сечения 200×100 мм равен 2,43. Погрешность значений, полученных с помощью рис. В.19 [1] и программы SolidWorks, составляет 10 %.

Исходные данные для расчета аэродинамических характеристик антенн приняты аналогичными. Схема модели для расчета показана на рис. 5. Был произведен расчет 125 моделей различных размеров. Вылет антенны изменялся от 100 до 200 мм с шагом 25 мм, ширина антенны изменялась от 200 до 400 мм с шагом 50 мм, толщина антенны изменялась от 100 до 200 мм с шагом 25 мм.

Результаты

Некоторые результаты расчета лобового аэродинамического сопротивления занесены в табл. 1.

Эпюра изменения скорости ветрового потока расчетной модели показана на рис. 6.

По полученным значениям были построены графики зависимости аэродинамического коэффициента от вылета панельных антенн (рис. 7). Аналогично были получены графики зависимости произведения аэродинамического коэффициента и ветровой ширины от вылета панельных антенн (рис. 8). Величина произведения аэродинамического коэффициента на ветровую ширину отображает величину ветровой нагрузки, передаваемую на ствол опоры двойного назначения.

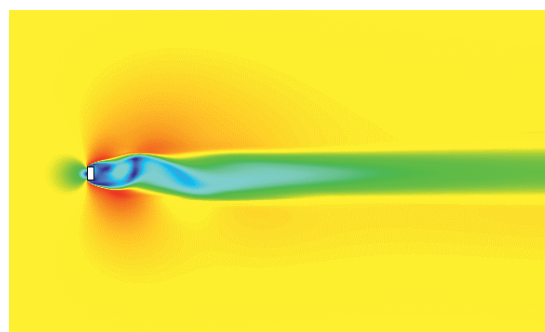


Рис. 4. Эпюра изменения скорости ветрового потока
Fig. 4. Diagram of a change in the wind flow velocity

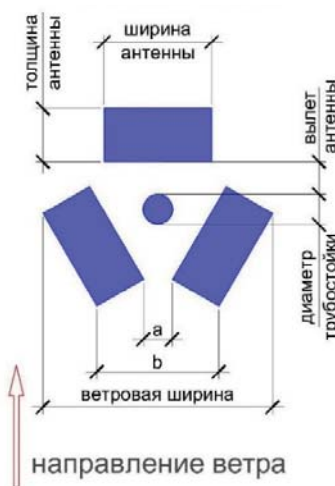


Рис. 5. Схема расчетной модели
Fig. 5. Scheme of the computational model

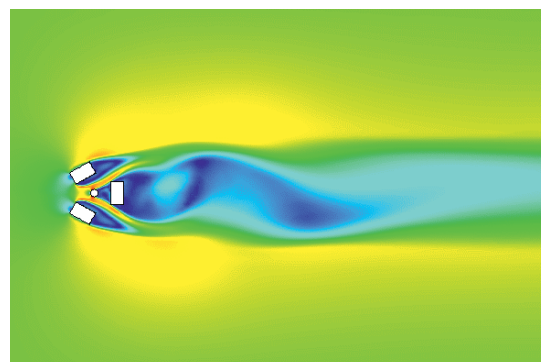


Рис. 6. Эпюра изменения скорости ветрового потока расчетной модели
Fig. 6. Diagram of the change in the wind flow velocity of the computational model

Таблица 1

Результаты виртуальных испытаний

Table 1

Virtual test results

Диаметр трубостой- ки, мм	Вылет антенны, мм	Размер антенны		Ветровая ширина, м	a, м	b, м	Лобовое аэродина- мическое сопротивле- ние при на- правлении ветра, Н	Аэродина- мический коэффици- ент при на- правлении ветра	Произведе- ние ветровой ширины и аэ- родинамиче- ского коэффи- циента, м
		ширина, мм	толщи- на, мм				между ан- теннами	между ан- теннами	
114	100	200	200	0,72	0,17	0,52	710	0,95	0,679
	100	250	200	0,74	0,15	0,49	838	1,08	0,802
	100	300	200	0,77	0,12	0,47	1023	1,27	0,979
	100	350	200	0,79	0,10	0,44	1079	1,30	1,032
	100	400	200	0,82	0,07	0,42	1096	1,28	1,048
	125	200	200	0,76	0,22	0,56	796	1,00	0,761
	125	250	200	0,79	0,19	0,54	892	1,08	0,853
	125	300	200	0,81	0,17	0,51	868	1,02	0,830
	125	350	200	0,84	0,14	0,49	1193	1,36	1,141
	125	400	200	0,86	0,12	0,46	1219	1,35	1,166
	150	200	200	0,80	0,26	0,60	842	1,00	0,805
	150	250	200	0,83	0,23	0,58	876	1,01	0,838
	150	300	200	0,85	0,21	0,55	1029	1,15	0,984
	150	350	200	0,88	0,18	0,53	1035	1,13	0,990
	150	400	200	0,90	0,16	0,50	1268	1,34	1,213
	175	200	200	0,85	0,30	0,65	778	0,88	0,744
	175	250	200	0,87	0,28	0,62	934	1,02	0,893
	175	300	200	0,90	0,25	0,60	999	1,06	0,956
	175	350	200	0,92	0,23	0,57	1018	1,05	0,974
	175	400	200	0,95	0,20	0,55	1219	1,23	1,166
	200	200	200	0,89	0,35	0,69	767	0,82	0,734
	200	250	200	0,92	0,32	0,67	878	0,92	0,840
	200	300	200	0,94	0,30	0,64	1029	1,05	0,984
	200	350	200	0,97	0,27	0,62	1178	1,17	1,127
	200	400	200	0,99	0,25	0,59	1264	1,22	1,209

Выводы

По результатам выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- Аэродинамический коэффициент уменьшается с увеличением вылета панельных антенн от трубостойки вне зависимости от их размера. Чем больше панельные антенны прижаты к трубостойке, тем ближе они находятся к соседним антеннам, тем самым затрудняя продувания сечения в центре.
- Величина произведения аэродинамического коэффициента на ветровую ширину отображает величину ветровой нагрузки, передаваемую на ствол опоры двойного назначения. Как видно

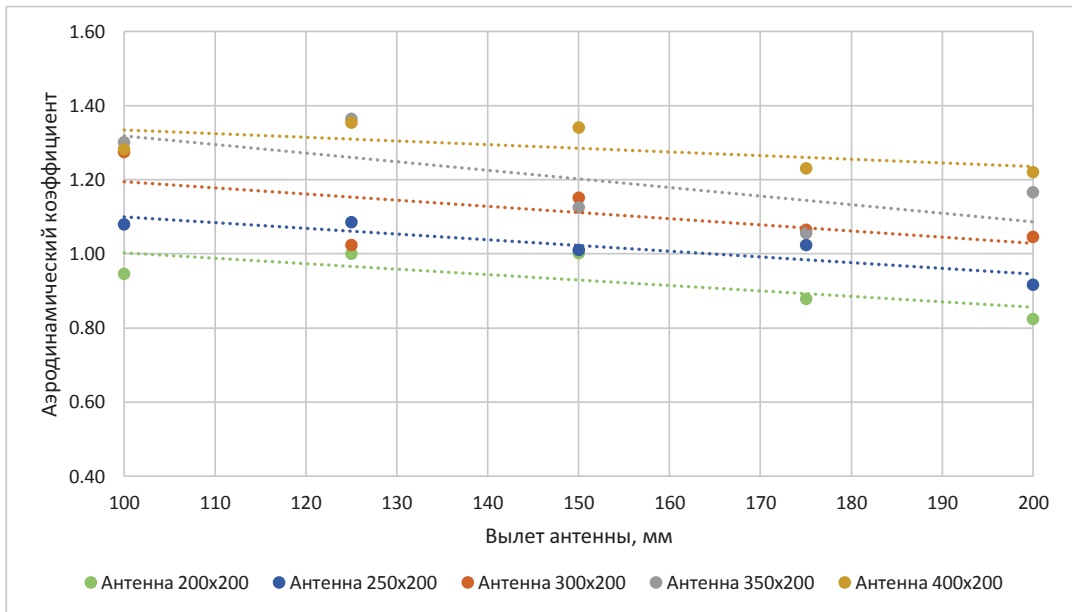


Рис. 7. Графики зависимости аэродинамического коэффициента от вылета антенн
Fig. 7. Dependence of the aerodynamic coefficient on the antenna projection

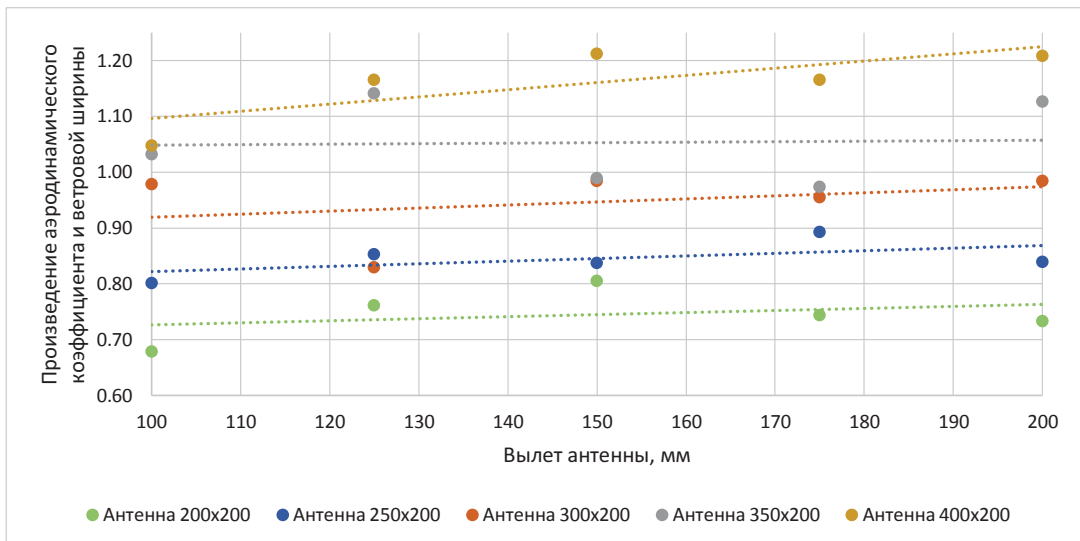


Рис. 8. Графики зависимости произведения аэродинамического коэффициента и ветровой ширины от вылета антенн
Fig. 8. Product of the aerodynamic coefficient and the wind width vs the antenna projection

из графиков зависимости, аэродинамический коэффициент уменьшается от увеличения вылета от трубостойки, величина ветровой нагрузки практически не меняется. Лишь при большой ширине и толщине антенны нагрузка в зависимости от вылета антенны увеличивается.

При проектировании панельных антенн на трубостойке диаметром 114 мм необходимо руководствоваться размером сечения панельных антенн. Если ширина панельной антенны

более 350 мм, а толщина более 150 мм, то рекомендуется проектировать установку таких панельных антенн как можно ближе к рассматриваемой трубостойке, чтобы уменьшить ветровую нагрузку на опору двойного назначения. В остальных случаях вылет панельных антенн не окажет существенного влияния на увеличение ветровой нагрузки.

Список литературы

1. Распоряжение Правительства Москвы «О мерах по размещению оборудования базовых станций подвижной радиотелефонной связи и контактной сети на опорах наружного освещения в городе Москве» от 25 апреля 2023 г. № 265-РП [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1301461719>
2. Сотовая связь. История. Стандарты. Технологии [интернет]. Режим доступа: <http://celnet.ru/gal49.php> (дата доступа 09.08.2023).
3. SolidWorks. Википедия [интернет]. Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> (дата обращения 08.09.2023).
4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Москва: Стандартинформ; 2018.
5. Ferris M. (June 2009). Wind Loading on Base Station Antennas [internet]. Available at: <https://www.cosconor.fr/GSM/Divers/Equipment/Andrew/White%20papers/Wind%20loading.pdf>

References

1. Order of the Government of Moscow "On measures for the placement of equipment for mobile radiotelephone base stations and a contact network on outdoor lighting poles in the city of Moscow" dated April 25, 2023 No. 265-RP [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1301461719> (In Russian).
2. Cellular communication. History. Standards. Technologies [internet]. Available at: <http://celnet.ru/gal49.php> (accessed 09 August 2023). (In Russian).
3. SolidWorks. Wikipedia [internet]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/SolidWorks> (accessed 08 September 2023). (In Russian).
4. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85*. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
5. Ferris M. (June 2009). Wind Loading on Base Station Antennas [internet]. Available at: <https://www.cosconor.fr/GSM/Divers/Equipment/Andrew/White%20papers/Wind%20loading.pdf>

Информация об авторах / Information about the authors

Татьяна Александровна Белаш, д-р техн. наук, советник РААСН, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва
Tat'yana A. Belash, Dr. Sci. (Engineering), Counsellor, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Professor, Department of Building Facilities, Structures and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

Родион Романович Сафин✉, аспирант, АО «НИЦ «Строительство»; главный конструктор по новым разработкам, ГК «Новые башни», Москва
e-mail: rod1on1991@mail.ru
Rodion R. Safin✉, Postgraduate Student, JSC Research Center of Construction; Chief Designer for New Developments, GC Novye bashni, Moscow
e-mail: rod1on1991@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 694.14

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-29-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-29-39)

EDN: FSOHRC

ПРИМЕНЕНИЕ РЕЗЬБОВЫХ ШАЙБ В СОЕДИНЕНИЯХ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И.В. ВАНИН 

М.В. АРИСКИН, канд. техн. наук

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ул. Германа Титова, д. 28, г. Пенза, 440028, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Одним из перспективных видов соединений деревянных конструкций является соединение с применением вклеенных стальных шайб. Вместе с тем применение клеевых составов по ряду признаков менее технологично по сравнению с резьбовым соединением. Учитывая актуальность разработки новых технологичных видов соединений конструкций, необходимо изучить узловое соединение деревянных элементов на резьбовых шайбах без применения клеевых составов.

Цель: изучить характер работы соединения с применением резьбовых шайб посредством проведения натурного эксперимента серий образцов с различными параметрами резьбовых шайб для оценки перспективы дальнейшего изучения рассматриваемого соединения и его внедрения в практику строительства.

Материалы и методы. Методика исследования рассматриваемого соединения включает в себя изготовление серии образцов и проведение эксперимента для определения разрушающих нагрузок и предельных деформаций с последующим визуальным исследованием образцов после разрушения.

Результаты. На основании экспериментального исследования двенадцати образцов, составляющих четыре серии образцов с различными параметрами резьбовых шайб по три образца в каждой, получены значения разрушающих нагрузок и построены графики деформаций. Исследован характер работы рассматриваемого соединения, выявлены его достоинства и недостатки с точки зрения несущей способности, технологичности изготовления и надежности.

Выводы. Соединение деревянных конструкций на резьбовых шайбах обладает высокой несущей способностью и технологичностью. Несмотря на такой недостаток, как влияние влажности древесины на прочность и надежность данного соединения, его достоинства делают перспективным дальнейшее изучение и его применение в практике строительства.

Ключевые слова: деревянные конструкции, соединения, резьбовые шайбы, технологичность, скорость сборки

Для цитирования: Ванин И.В., Арискин М.В. Применение резьбовых шайб в соединениях деревянных конструкций. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):29–39. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-29-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-29-39)

Вклад авторов

Ванин И.В. – подготовка оборудования, изготовление образцов, описание методики эксперимента, проведение экспериментального исследования, анализ результатов, написание статьи.

Арискин М.В. – разработка идеи, написание выводов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.01.2024

Поступила после рецензирования 21.03.2024

Принята к публикации 28.03.2024

USE OF THREADED WASHERS IN THE JOINTS OF WOODEN STRUCTURES

I.V. VANIN[✉]

M.V. ARISKIN, Cand. Sci. (Engineering)

Penza State University of Architecture and Construction, Hermana Titova str., 28, Penza, 440028, Russian Federation

Abstract

Introduction. One of the promising types of joints in wooden structures is the joint using glued steel washers. However, the use of adhesive compounds is, for a number of reasons, characterized by lower manufacturability as compared to a threaded connection. Given the relevance of developing new technological types of joints in structures, it is necessary to study the threaded washer connection of wooden elements without the use of adhesives.

Aim. To study the performance of a threaded washer connection by conducting a full-scale experiment of specimens exhibiting different parameters of threaded washers in order to assess the prospects for further study of the joint in question and its implementation in construction practice.

Materials and methods. The procedure for studying the joint under consideration involves making a series of specimens and conducting an experiment to determine the failure loads and ultimate strains, followed by the visual inspection of these specimens after failure.

Results. The experimental study of twelve specimens (four series of specimens exhibiting different parameters of threaded washers, with three specimens in each) yielded failure loads, and graphs showing their deformation were constructed. The performance of the joint in question was examined; its advantages and disadvantages in terms of bearing capacity, manufacturability, and reliability were identified.

Conclusions. Threaded washer joints in wooden structures are characterized by high bearing capacity and manufacturability. In spite of such a disadvantage as the effect of wood moisture on the strength and reliability of this joint, its advantages make it promising for further study and use in construction practice.

Keywords: wooden structures, joints, threaded washers, manufacturability, assembly speed

For citation: Vanin I.V., Ariskin M.V. Use of threaded washers in the joints of wooden structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):29–39. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-29-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-29-39)

Authors contribution statement

Vanin I.V. – preparation of equipment; production of specimens; description of the experimental procedure; conducting of the experimental study; analysis of results; writing of the article.

Ariskin M.V. – idea development; writing of conclusions.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.01.2024

Revised 21.03.2024

Accepted 28.03.2024

Введение

Одним из актуальных направлений в исследовании строительных структур является разработка новых видов соединений деревянных конструкций [1–3]. Ввиду особенностей древесины как строительного материала к узловым соединениям деревянных элементов предъявляются определенные требования. Многие из них обусловлены такой особенностью древесного материала, как анизотропность [4, 5]. По причине отличия друг от друга физико-механических характеристик материала в разных геометрических направлениях соединения деревянных конструкций получили большое разнообразие как по способам передачи внутренних усилий между элементами, так и по типу соединительных деталей [6–8]. Одним из перспективных способов соединения деревянных конструкций является соединение с применением круглых шайб, заподлицо вклеиваемых или вкладываемых в заранее выбранные гнезда в деревянных элементах. Шайба позволяет распределить усилия, передаваемые через стяжную шпильку на большую площадь, тем самым уменьшая концентрацию напряжений в месте передачи усилий. Вклеенные шайбы обладают высокой несущей способностью [9], однако попытка усилить их дополнительно резьбовым соединением со шпилькой приводит к значительному снижению несущей способности [10]. Вместе с тем вклеивание шайб требует определенных навыков и условий для работы с клеевыми составами, что увеличивает трудоемкость изготовления конструкции. Резьбовое же соединение менее требовательно к данным факторам, что создает интерес к его применению в соединениях деревянных конструкций с применением круглых стальных шайб [11, 12].

Цель исследования – изучить характер работы соединения деревянных конструкций с применением резьбовых шайб (ШР), определить влияние параметров шайб на несущую способность соединения.

Задачи исследования – провести натурный эксперимент серий образцов для определения разрушающих нагрузок и предельных деформаций, а также для изучения механизма работы соединения.

Методика проведения экспериментального исследования

В целях исследования характера работы рассматриваемого соединения и влияния параметров резьбовых шайб на несущую способность проведено экспериментальное исследование 4 серий по 3 образца в каждой. Для исследования использовались шайбы с максимальными и минимальными параметрами, принятыми по аналогии с соединениями на вклеенных шайбах [9, 13]: диаметр шайбы, $D_{ш}$, 60 и 100 мм, толщина шайбы, $t_{ш}$, 6 и 10 мм. Размеры деревянных элементов приняты в соответствии с параметрами шайб и требуемым шагом привязки (рис. 1).

Параметры образцов и маркировка серий приведены в табл. 1.

В качестве основного материала образцов выбрана древесина сосны 2-го сорта ввиду своей доступности и широкой области применения. Стальные элементы изготовлены из стали С255.

Технология изготовления образцов соединения на резьбовых шайбах включает в себя выборку гнезд под шайбы, сверление отверстия под шпильку и завинчивание шайб на шпильке. Гнезда под шайбы выбираются специальными фрезами с направляющим наконечником,

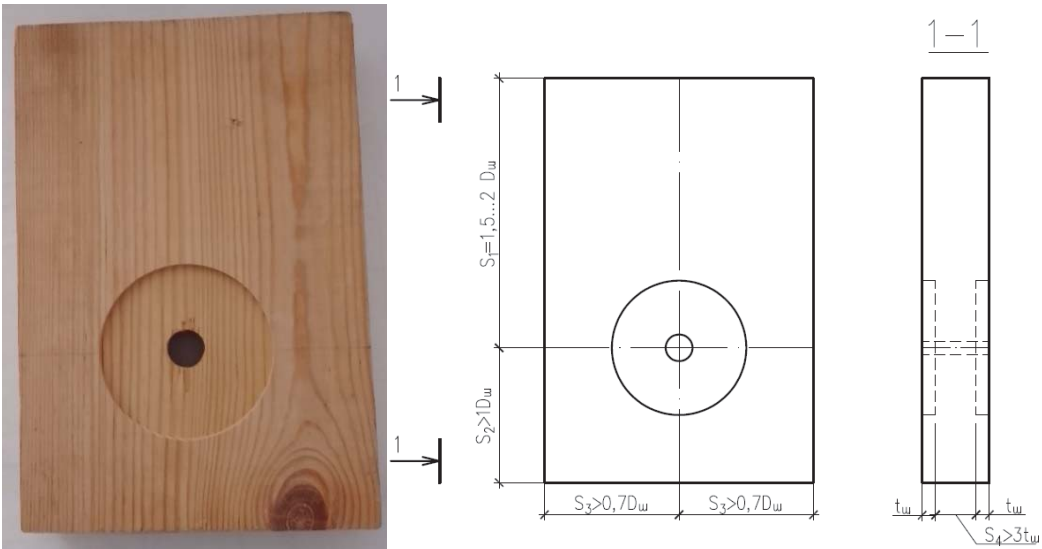


Рис. 1. Размеры испытываемых образцов
Fig. 1. Dimensions of the test specimens

Параметры образцов

Таблица 1

Parameters of the specimens

Table 1

№ п/п	Серия образцов	Количество образцов в серии, шт.	Длина образца, а, мм	Ширина образца, b, мм	Толщина образца, h, мм	Диаметр шайбы, Dш, мм	Толщина шайбы, tш, мм
1	ШР 60-6	3	200	150	50	60	6
2	ШР 60-10	3					10
3	ШР 100-6	3	300	200		100	6
4	ШР 100-10	3					10

обеспечивающим соосное расположение гнезд. Отверстие под шпильку высверливается на 1–2 мм больше диаметра шпильки для обеспечения передачи усилий на деревянный образец только через шайбы. Ввиду отсутствия соответствующей нормативной базы за-винчивание шайб осуществлялось в соответствии с СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012 [14], как в соединениях, не требующих обеспечения контроля натяжения. При диаметре стяжной шпильки 20 мм затяжка шайб должна осуществляться ключом с длиной рычага не менее 35 см до отказа. Данный способ сборки позволяет собирать соединение в кратчайшие сроки без применения специального оборудования.

После сборки образец устанавливается в сборную раму, имитирующую передачу нагрузки через стальные накладки (рис. 2). Готовый образец в раме помещается в испытательный стенд (рис. 3).

Для загрузки опытных образцов использовался гидравлический пресс П-500 со встроенным оборудованием для определения вертикальных перемещений. Данные о результатах



а (a)



б (b)

Рис. 2. Составные части испытываемого образца:

а – сборная рама; б – деревянный образец, шпилька и шайбы

Fig. 2. Components of the test specimen:

а – prefabricated frame; б – wooden specimen, stud, and washers

исследований (вертикальная нагрузка, деформации) записываются в журнал испытаний.

Образцы испытываются воздействием кратковременной нагрузки при скорости нагружения 4 кН/мин до их разрушения. За разрушающую нагрузку принималась та, при которой значительно увеличивается рост деформаций при относительно небольшом увеличении нагрузки.

Результаты испытаний

Разрушение образцов происходило без резких щелчков в древесине, однако наблюдались короткие проскальзывания шайб, которые можно отнести к так называемым «рыхлым деформациям», так как в дальнейшем наблюдался рост разрушающей нагрузки без явных признаков разрушения образцов. Кроме того, при дальнейшем нагружении проскальзывания шайб не наблюдалось. Данные о результатах испытаний представлены в табл. 2.

На рис. 4, 5 представлены графики зависимости разрушающей нагрузки от параметров шайб и образцы после разрушения.



Рис. 3. Образец, готовый к испытанию

Fig. 3. Specimen ready for testing

Таблица 2

Результаты испытаний образцов соединения ШР

Table 2

Results of testing the SHR joint specimens

№ п/п	Марка образца	Средняя разрушающая нагрузка, кН
1	ШР 60-6	67,65
2	ШР 60-10	78,12
3	ШР 100-6	78,4
4	ШР 100-10	101,14

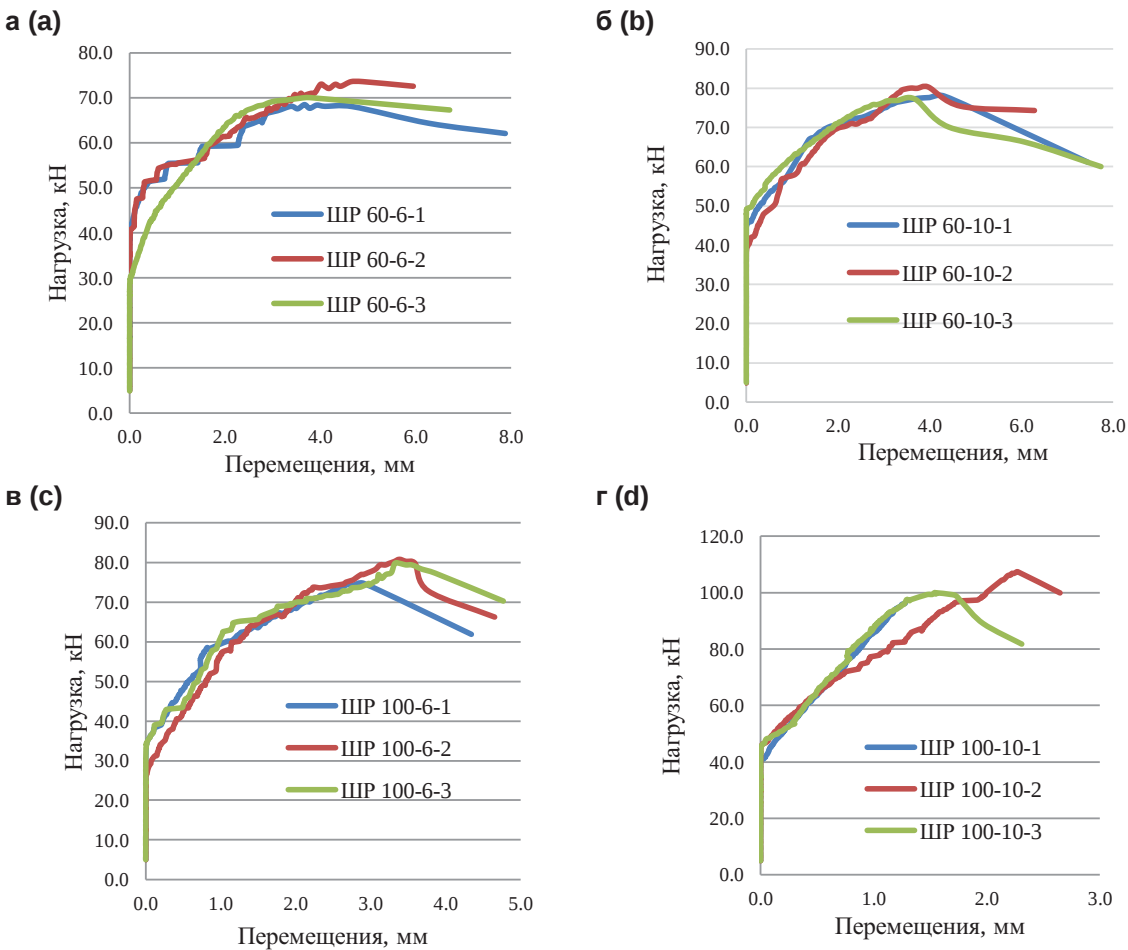


Рис. 4. Графики деформаций образцов: а – серия ШР 60-6; б – серия ШР 60-10; в – серия ШР 100-6; г – серия ШР 100-10

Fig. 4. Graphs showing specimen deformations: а – SHR 60-6 series; б – SHR 60-10 series; в – SHR 100-6 series; д – SHR 100-10 series



Рис. 5. Образцы после испытаний
Fig. 5. Specimens after testing

Исследование показало, что резьбовые шайбы обладают высокой несущей способностью, незначительно уступающей несущей способности клеиваемых шайб. К достоинствам данного соединения бесспорно можно отнести его скорость сборки, которая составляет 10–20 минут по сравнению с 7 днями [9]. Также нельзя не отметить, что монолитное соединение шайб и шпильки в узле позволяет перераспределить усилия между шайбами, тем самым увеличив надежность работы соединения.

В ходе нагружения образцов наблюдалось уплотнение шайб в гнездах, о чем свидетельствуют проскальзывания шайб, сопровождаемые громким звуком и соответствующими ступенями на графиках (ступени наиболее выражены на рис. 4а). Также можно сделать вывод, что несущая способность резьбовых шайб складывается из смятия древесины под ребром шайбы и силой трения между пластью шайбы и деревянным элементом, при этом, судя по характеру разрушения образцов, влияние первого фактора значительнее. Данное явление можно отнести как к достоинствам, так и к недостаткам разрабатываемого соединения.

В соединениях на клеенных шайбах после разрушения клеевого шва вся несущая способность шайб будет состоять из смятия древесины под ребрами шайб. Резьбовые шайбы, помимо того, что остаются монолитно связанными друг с другом через шпильку посредством резьбы, с ростом нагрузки только плотнее прилегают к деревянному элементу, тем самым делая разрушение образца более пластичным.

Вместе с тем силы трения между деревом и металлической шайбой значительно зависят от силы затяжения шайб [15, 16], шероховатости контактных поверхностей и влажности древесины. Как было сказано выше, для контроля затяжения целесообразно воспользоваться рекомендациями СТО НОСТРОЙ 2.10.76-2012 [14], выполнения требований которых достаточно для создания требуемого затяжения и сохранения технологичности сборки соединения. Механическое увеличение трения между шайбой и древесиной приведет к увеличению усилий, требуемых для затяжения шайб, что приведет к снижению технологичности соединения и может повлиять на снижение усилия затяжения шайб. При этом, учитывая, что основная часть несущей способности складывается из усилий смятия под ребрами шайб, увеличение несущей способности соединения будет не столь значительно [17, 18].

Влажность древесины играет значительную роль во всех видах соединений деревянных конструкций. В рассматриваемом соединении высокая влажность древесины может сильно повлиять на трение между шайбой и древесиной, а после усушки значительно уменьшится

усилие затяжения шайб, что критично снизит несущую способность соединения [19, 20]. Влияние влажности древесины на несущую способность соединения на резьбовых шайбах необходимо исследовать дополнительно.

Выводы

Экспериментальное исследование соединения на резьбовых шайбах показало, что данное соединение обладает высокой несущей способностью и технологичностью. За счет изменения способа фиксации шайб в деревянном элементе, а именно замены клеевой композиции резьбовым соединением, значительно ускоряется изготовление и сборка соединения и конструкции в целом при практически незначительном уменьшении несущей способности.

Аналогично вклеенным шайбам несущая способность резьбовых шайб складывается из сопротивления смятию древесины под ребрами шайб и усилий, возникающих под пластинами шайб. Отличие заключается в том, что эти усилия являются силами трения между шайбами и деревянным элементом. Кроме того, существенным отличием является тот факт, что резьбовые шайбы монолитно связаны друг с другом, что приводит к равномерному распределению усилий между шайбами.

Вместе с тем применение резьбовых шайб в узлах деревянных конструкций может быть сопряжено с таким недостатком, как влияние влажности древесины, что требует дополнительного изучения.

Тем не менее соединение на резьбовых шайбах обладает большим рядом достоинств, которые предлагают перспективы для дальнейшего изучения данного соединения и его применения в практике строительства.

Список литературы

1. Жаданов В.И., Лисицкий И.И., Пересыпкина В.А. Вклеенные плоские пластины в узлах сквозных деревянных конструкций. В: Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры. Материалы Всероссийской научно-методической конференции (с международным участием). Оренбург: Оренбургский государственный университет; 2021, с. 135–140.
2. Сибен А.В. Клееные деревянные конструкции в строительстве: эффективность и проблемы применения. В: Новые технологии - нефтегазовому региону. Материалы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. 3. Электроэнергетика, электро- и теплотехника. Экономика и управление предприятиями, отраслями, комплексами. Инвестиционно-строительный инжиниринг. Строительные материалы и изделия. Промышленное и гражданское строительство, реконструкция и эксплуатация. Строительство и эксплуатация автомобильных дорог и аэродромов. Инженерные системы и сооружения. Тюмень; 2022, с. 180–183.
3. Orlov A.O., Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings. ARPN Journal of engineering and applied sciences. 2018;13(11):3851–3856.
4. Михайленко О.А. Численные исследования объемного напряженно-деформированного состояния древесины опорных и коньковых узлов большепролетной трехшарнирной дощатоклееной арки. В: Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы. Материалы XI Всероссийской научно-практической конференции Рубцовский индустриальный институт (филиал) федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова». Барнаул: Рубцовский индустриальный институт; 2021, с. 226–233.

5. Федченко В.Ю., Федченко А.А., Маскайкина С.Е., Юфкин Ю.Г., Бурьянов И.В., Дронин А.М., Петякшев А.Д. Проблемы расчета и конструирования малогабаритного оборудования. В: XLIX Огаревские чтения. Материалы научной конференции. Ч. 1. Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева; 2021, с. 595–600.
6. Жаданов В.И., Гарипов В.С., Лисицкий И.И. Оценка влияния различных факторов на несущую способность соединений клеенных стальных пластин с массивом древесины. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2022;(6):15–29. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-762-6-15-29>
7. Москов С.А., Черных А.Г., Глухих В.Н. Расчет несущей способности соединения деревянных конструкций с МЗП на металлических накладках. В: Инновации в деревянном строительстве. Материалы 11-й Международной научно-практической конференции. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2021, с. 156–162.
8. Лукин М.В., Чибрикин Д.А., Рощина С.И. Численные исследования модифицированных композитных балок с учетом физической нелинейности древесины. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2023;(5):5–19. <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-773-5-5-19>
9. Вдовин В.М., Арискин М.В. Несущая способность соединений на клеенных шайбах при передаче усилий вдоль волокон древесины. Приволжский научный журнал. 2009;(4):21–27.
10. Ванин И.В., Арискин М.В. Соединение деревянных конструкций с применением клеенных стальных шайб с внутренней резьбой. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;35(4):30–39. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-30-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-30-39)
11. Тодышев С.С., Шатобин И.А. История возникновения винтовой резьбы. В: Студент: наука, профессия, жизнь. Материалы IX Всероссийской студенческой научной конференции с международным участием. Ч. 4 (естественные и формальные науки). Омск: Омский гос. ун-т путей сообщения; 2022, с. 177–184.
12. Юзбашиев Б.Р., Паньшина Е.В. Резьбовые соединения. В: Теоретические и практические аспекты развития современной науки: теория, методология, практика. Сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции. Уфа: Научно-издательский центр «Вестник науки»; 2022, с. 90–95.
13. Арискин М.В., Мартышкин Д.О. Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях. Региональная архитектура и строительство. 2022;(2):96–103. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_96
14. Письмо Ростехнадзора от 14.08.2012 N 00-02-05/2054 «О стандартах СПО, разработанных НОСТРОЙ» [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/pismo-rostekhnadzora-ot-14082012-n-00-02-052054-o/>
15. Арискин М.В., Ванин И.В. Соединение деревянных конструкций на стальных шайбах с внутренней резьбой. Региональная архитектура и строительство. 2022;(4):84–89. https://doi.org/10.54734/20722958_2022_4_84
16. Юдаев Н.В., Денисов Р.А., Елисеев И.И. К определению силы затяжки резьбового соединения. В: Проблемы экономичности и эксплуатации автотракторной техники. Материалы XXXV Международной научно-технической конференции имени В.В. Михайлова. Вып. 35. Саратов: Амирит; 2022, с. 141–146.
17. Сергеева В.В., Тимченко Н.А., Новеченок А.П. Влажность древесины как физический фактор. В: Агропромышленный комплекс: проблемы и перспективы развития. Материалы всероссийской научно-практической конференции. Т. 2. Благовещенск: Дальневосточный государственный аграрный университет; 2022, с. 359–364.
18. Шмидт А.Б., Груничев Д.В., Груничев В.С. Применение шпильки с метрической резьбой по всей длине в качестве нагеля в нагельных соединениях деревянных конструкций. В: Инновации в деревянном строительстве. Материалы 12-й Международной научно-технической конференции. Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет; 2023, с. 18–27.
19. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Стоянов В.О. Опыт эксплуатации большепролетных клееных деревянных конструкций с узлами системы ЦНИИСК. Строительная механика и расчет сооружений. 2022;(6):61–68. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.61.68>
20. Стородубцева Т.Н., Недорезова А.Р. Влияние воды на прочностные и упругие характеристики древесины сосны. В: Научные механизмы решения проблем инновационного развития. Сборник статей Международной научно-практической конференции. Ч. 2. Уфа: Омега Сайнс; 2017, с. 80–83.

References

1. Zhadanov V.I., Lisitsky I.I., Peresyphkina V.A. Glued flat plates in nodes of through wooden structures. In: The University complex as a regional center of education, science and culture. Materials of the All-Russian Scientific and Methodological conference (with international participation). Orenburg: Orenburg State University; 2021, pp. 135–140. (In Russian).
2. Siben A.V. Glued wooden structures in construction: efficiency and application problems. In: New technologies for the oil and gas region. Materials of the International Scientific and Practical Conference of students, postgraduates and young scientists. Vol. 3. Electric power industry, electrical and thermal engineering. Economics and management of enterprises, industries, and complexes. Investment and construction engineering. Building materials and products. Industrial and civil construction, reconstruction and operation. Construction and operation of highways and airfields. Engineering systems and structures. Tyumen; 2022, pp. 180–183. (In Russian).
3. Orlov A.O., Rimshin V.I., Labudin B.V., Melekhov V.I., Kurbatov V.L. Improvement of strength and stiffness of components of main struts with foundation in wooden frame buildings. ARPN Journal of engineering and applied sciences. 2018;13(11):3851–3856.
4. Mikhailenko O.A. Numerical studies of the volumetric stress-strain state of the wood of the support and ridge nodes of a large-span three-hinged board-glued arch. In: Modern technology and technology: problems, state and prospects. Materials of the XI All-Russian Scientific and practical conference. Rubtsovsky Industrial Institute (branch) of the Federal State budgetary educational institution of higher education "Altai State Technical University named after I.I. Polzunov". Barnaul: Rubtsovsky Industrial Institute; 2021, pp. 226–233. (In Russian).
5. Fedchenko V.Yu., Fedchenko A.A., Maskaikina S.E., Yufkin Yu.G., Buryanov I.V., Dronin A.M., Petyakshev A.D. Problems of calculation and design of small-sized equipment. In: XLIX Ogarev readings. Materials of the scientific conference. Part 1. Saransk: Ogarev Mordovia State University; 2021, pp. 595–600. (In Russian).
6. Zhadanov V.I., Garipov V.S., Lisitsky I.I. Assessment of the influence of various factors on the bearing capacity of joints of glued steel plates with solid wood. News of higher educational institutions. Construction. 2022;(6):15–29. (In Russian). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2022-762-6-15-29>
7. Moskov S.A., Chernykh A.G., Glukhikh V.N. Load-bearing capacity calculation of connection of timber structures with nail-plate on metal plates. In: Innovations in wooden construction. Materials of the 11th International Scientific and Practical Conference. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2021, pp. 156–162. (In Russian).
8. Lukin M.V., Chibrikov D.A., Roshchina S.I. Numerical studies of modified composite beams taking into account the physical nonlinearity of wood. News of higher educational institutions. Construction. 2023;(5):5–19. (In Russian). <https://doi.org/10.32683/0536-1052-2023-773-5-5-19>
9. Vdovin V.M., Ariskin M.V. Bearing capacity of joints on glued washers when transferring forces along wood fibers. Privolzhsky scientific journal. 2009;(4):21–27. (In Russian).
10. Vanin I.V., Ariskin M.V. Joining of wooden structures using insert threaded steel washers. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;35(4):30–39. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-30-39](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-30-39)
11. Todyshev S.S., Shatobin I.A. The history of screw thread. In: Student: science, profession, life. Materials of the IX All-Russian student scientific conference with international participation. Part 4 (natural and formal sciences). Omsk: Omsk State Transport University; 2022, pp. 177–184. (In Russian).
12. Yuzbashiev B.R., Panshina E.V. Threaded connections. In: Theoretical and practical aspects of the development of modern science: theory, methodology, practice. Collection of scientific articles based on the materials of the IX International Scientific and Practical Conference. Ufa: Scientific Publishing Center "Vestnik nauki"; 2022, pp. 90–95. (In Russian).
13. Ariskin M.V., Martyshkin D.O. Connections on glued fiberglass washers in wooden structures. Regional Architecture and Engineering. 2022;(2):96–103. (In Russian). https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_96
14. Rostekhnadzor letter dated 08/14/2012 N 00-02-05/2054 "On SRO standards developed by NOSTRA" [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/pismo-rostekhnadzora-ot-14082012-n-00-02-052054-o/> (In Russian).
15. Ariskin M.V., Vanin I.V. Connection of wooden structures on steel washers with internal thread. Regional Architecture and Engineering. 2022;(4):84–89. (In Russian). https://doi.org/10.54734/20722958_2022_4_84

16. Yudaev N.V., Denisov R.A., Eliseev I.I. To determine the tightening force of a threaded connection. In: Problems of efficiency and operation of automotive equipment. Materials of the XXXV International Scientific and Technical Conference named after V.V. Mikhailov. Iss. 35. Saratov: Amirit Publ.; 2022, pp. 141–146. (In Russian).
17. Sergeeva V.V., Timchenko N.A., Novechenok A.P. Wood moisture as a physical factor. In: Agro-industrial complex: problems and prospects of development. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Vol. 2. Blagoveshchensk: Far Eastern State Agrarian University; 2022, pp. 359–364. (In Russian).
18. Schmidt A.B., Grunichev D.V., Grunichev V.S. The use of a stud with metric thread along the entire length as a nail in nail joints of wooden structures. In: Innovations in wooden construction. Materials of the 12th International Scientific and Technical Conference. St. Petersburg: Saint Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2023, pp. 18–27. (In Russian).
19. Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Stoyanov V.O. Experience in the operation of large-span glued wooden structures with TSNIISK system nodes. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2022;[6]:61–68. (In Russian). <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.61.68>
20. Storodubtseva T.N., Nedorezova A.R. The influence of water on the strength and elastic characteristics of pine wood. In: Scientific mechanisms for solving problems of innovative development. Collection of articles of the International Scientific and Practical Conference. Part 2. Ufa: Omega Sains Publ.; 2017, pp. 80–83. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Илья Владимирович Ванин , аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: ya.vanin94@yandex.ru

тел.: +7 (927) 091-81-96

Ilya V. Vanin , Postgraduate student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: ya.vanin94@yandex.ru

tel.: +7 (927) 091-81-96

Максим Васильевич Арискин, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

тел.: +7 (927) 374-25-44

Maxim V. Ariskin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

tel.: +7 (927) 374-25-44

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.072.2.014

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-40-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-40-60)

EDN: FXWZHB

УСТАНОВКА ПОРТАЛОВ В МЕСТАХ ВЫБИВКИ КОЛОНН ПРИ ПЕРЕОБОРУДОВАНИИ ЦЕХОВ ОАО «ТАГМЕТ»

М.И. ГУКОВА¹, канд. техн. наук

М.И. ФАРФЕЛЬ^{1,2,✉}, канд. техн. наук

Д.В. КОНДРАШОВ¹

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

Аннотация

Введение. Представлены материалы по мероприятиям, проводимым в трубопрокатных цехах ОАО «Тагмет», в период модернизации, начиная с 2007 года. Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций им. В.А. Кучеренко в течение продолжительного времени проводил обследования конструкций цехов завода с целью выдачи заключений по их промышленной безопасности и рекомендаций по ремонту и усилению поврежденных элементов строительных конструкций для возможности дальнейшей безопасной их эксплуатации, в том числе цехов, в которых изменялся технологический процесс в связи с установкой нового оборудования.

Цель работы: на основе результатов обследования смешанных конструкций, расчетов и анализов резервов их несущей способности показать один из способов реконструкции промышленных зданий на примере цехов, расположенных на территории ОАО «Тагмет».

Материалы. В статье приведены чертежи КМ и представлены фотографии уже возведенных стальных конструкций для их усиления и изменения существующих параметров каркаса здания, пригодных для новых условий эксплуатации.

Результаты. Приведены рекомендации по усилению конструкций, полезные для использования их при аналогичных мероприятиях. На основе работ по научно-техническому сопровождению проектирования и строительства модернизированных трех цехов завода ОАО «Тагмет» в последующие годы завод непрерывно увеличивал свою производительность.

Выводы. При обследовании и проведении экспертиз промышленной безопасности конструкций зданий завода ОАО «Тагмет» дефекты и повреждения, превышающие значения, установленные действующими нормативными документами, влияющие на эксплуатационную пригодность зданий, выявлены не были. Полученные результаты выполненных расчетов конструкций порталов в местах выбивки колонн каркасов зданий цехов завода показали, что их прочность и устойчивость обеспечены. Проектные решения были успешно реализованы при реконструкции цехов ОАО «Тагмет».

Ключевые слова: сталь, стальная конструкция, здание, каркас, несущая способность, жесткость, колонна, балка, железобетон, стержень, сварной элемент, связь

Для цитирования: Гуква М.И., Фарфель М.И., Кондрашов Д.В. Установка порталов в местах выбивки колонн при переоборудовании цехов ОАО «Тагмет». Вестник НИЦ «Строительство». 2024;41(2):40–60. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-40-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-40-60)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнялось за счет средств заказчика ОАО «Тагмет».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 05.04.2024

Поступила после рецензирования 24.04.2024

Принята к публикации 02.05.2024

INSTALLATION OF PORTALS IN THE SECTIONS OF THE COLUMN DEMOLITION DURING THE RE-EQUIPMENT OF TAGMET JSC WORKSHOPS

M.I. GUKOVA¹, Cand. Sci. (Engineering)

M.I. FARFEL^{1,2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. KONDRASHOV¹

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

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

Abstract

Introduction. The article presents the materials on the activities, carried out in the pipe rolling shops of the Tagmet JSC during the modernization period, starting from 2007. The Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, conducted prolonged surveys of plant workshop structures in order to issue conclusions on their industrial safety and recommendations for the repair and strengthening of damaged elements in building structures for their further safe operation, including workshops, where the technological process has been changed due to the installation of new equipment.

Aim. To demonstrate one of the ways to reconstruct industrial buildings using the example of workshops, located in the territory of the Tagmet JSC, based on a survey of combined structures, calculations and analyzes of their bearing capacity margins.

Materials. The article provides the drawings of original metal structures and photographs of steel structures, already built to reinforce them and change the existing parameters of the building frame to suitable ones for new operating conditions.

Results. Recommendations for structural strengthening, applicable for similar activities, are given. Due to the scientific and technical support for the design and construction of three modernized Tagmet workshops, the plant continuously increased its productivity in subsequent years.

Conclusions. No defects and damage, which exceed the values, established by the current regulatory documents, and affect the operational suitability of buildings, were revealed during the inspection and operational safety examination of Tagmet plant structures. The results of the calculations, performed to the portal structures at the column demolition sections of the plant workshop building frames, proved the assurance of their strength and stability. The design solutions were successfully implemented during the reconstruction of workshops at the Tagmet JSC.

Keywords: steel, steel structure, building, frame, bearing capacity, rigidity, column, beam, concrete, rod, welded element, junction

For citation: Gukova M.I., Farfel M.I., Kondrashov D.V. Installation of portals in the sections of the column demolition during the re-equipment of Tagmet JSC workshops. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):40–60. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-40-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-40-60)

Authors contribution statement

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

Funding

The study was carried out at the expense of the Tagmet JSC.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 05.04.2024

Revised 24.04.2024

Accepted 02.05.2024

Введение

Начиная с 1995 года сотрудники ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко в соответствии с [1] в течение продолжительного времени проводили обследования [2] и экспертизы промышленной безопасности [3] конструкций цехов завода «Тагмет». В 2007–2008 годах ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко проводил договорную работу по «Научно-техническому сопровождению проектирования и строительства комплекса непрерывного стана PQF на ОАО «Тагмет».

В трубопрокатных цехах, построенных по проектам 1967–1968 годов, на заводе «Тагмет» до 2007 года эксплуатировался трубопрокатный агрегат с пилигримовым станом 4–6". За время эксплуатации в цехах были осуществлены мероприятия, обеспечивающие значительное расширение диапазона диаметров и номенклатуры выпускаемых труб. Был установлен импортный многоклетевой редуционно-растяжной стан (РРС) и поточные линии отделки труб, но перевооружение цехов продолжалось.

В проектах технического перевооружения было предусмотрено сооружение:

- нагревательных печей;
- трубопрокатного агрегата (ТПА) с непрерывным станом PQF поставки фирмы SMS MEER (Германия) на месте демонтированного прокатного агрегата с пилигримовым станом;
- нового термоотдела с оборудованием фирмы OLIVOTTO (Италия) на месте демонтированного устаревшего оборудования отделки.

Существующий редуционно-растяжной стан и следующая за ним пила сохранялись и встраивались в общий поток.

В связи с установкой нового оборудования в здании ТПЦ-1 и металлургической части здания ТПЦ-2, а также изменения технологического процесса производства труб в здании трубосварочного цеха (ТСЦ-4), переоборудуемого в трубопрокатный цех ТПЦ (участок 3), возникла необходимость увеличения шага некоторых колонн каркасов этих зданий.

Конструктивные особенности опорных конструкций под выбиваемые колонны здания ТСЦ-4, переоборудованного в трубопрокатный цех (участок 3)

Первоначально ТСЦ-4 был предназначен для производства сварных труб различного диаметра из штрипса, который после листопрямильной и стыкосварочной машин подавался в печь для нагрева и сварки труб нужного диаметра.

Здание ТСЦ-4 представляет собой блок из трех пролетов А–Б, Б–В и В–Г (оси 1–63) и пристроенных объектов со стороны ряда А (рис. 1).

В здании ТСЦ-4 по рядам А, Б, В и Г в основном были установлены железобетонные сборные двухветвевые колонны. По рядам А и Г установлены колонны крайнего ряда с шагом 6 м, по рядам Б и В – колонны среднего ряда с шагом 12 м. Колонны Б1, В1, Б5 и В5 – металлические двухветвевые среднего ряда.

В связи с установкой нового оборудования в пролете Б–В здания ТСЦ-4 возникла необходимость увеличения шага колонн по ряду Б (в осях 20–23 и 36–39) и по ряду В (в осях 10–13 и 25–28). В существующем здании шаг колонн по рядам Б и В был 12 м. Для увеличения шага колонн до 15 м в этих местах потребовалось демонтировать четыре колонны: Б21, Б37 и В11, В27.

В качестве опорной конструкции (рис. 2) под выбиваемые колонны по ряду Б (рис. 3) и по ряду В (рис. 4) были запроектированы жесткие в двух направлениях порталы, состоящие из ригеля в виде спаренной балки высотой 2,3 м и металлических колонн, устанавливаемых на расстоянии 10 и 5 м от выбиваемой колонны. Колонны – двухветвевые. Ветви выполнены из сварных двутавров, решетка – из прокатных уголков. Балки ригеля выполнены также из сварных двутавров. Полки обеих балок ригеля портала по двум уровням (на отм. +5,600 и +3,300) связаны горизонтальными треугольными связями. В месте выбивки колонн основные балки портала связаны поперечными балками. В окна существующих двухветвевых железобетонных колонн выше уровня их отрезки были установлены вспомогательные поперечные балки в двух уровнях (рис. 5 и 6).

Демонтированные существующие порталные вертикальные связи между колоннами Б37–Б39 и В27–В29 перенесены на оси 39–41 по ряду Б и на оси 29–31 по ряду В соответственно.

В местах выбивки железобетонных колонн, кроме того, были установлены дополнительные горизонтальные связи покрытия по нижним поясам стропильных ферм в осях 20–22 ряда Б и в осях 10–12 и 24–33 ряда В.

После временного закрепления в порталах (путем омоноличивания верхней зоны) мест опирания выбиваемых колонн (и после набора бетоном расчетной прочности) производилась отрезка и удаление нижних частей колонн.

Все металлические конструкции портала были изготовлены из сталей С255, С245 и С235 по ГОСТ 27772-88 [4] в соответствии с [5].

Все заводские соединения – на сварке, монтажные соединения – на сварке и на болтах с неконтролируемым натяжением. Болтовые соединения выполнены на болтах класса точности В, класса прочности 8.8.

Прочность бетона оставшихся частей железобетонных колонн определялась методом упругого отскока с использованием молотка Schmidt N-34 159590 фирмы PROCEQ. Прочность

исследуемых элементов проверялась по требованиям [6] на доступных для обследования участках. Проведено 30 измерений на трех колоннах. В результате анализа полученных материалов было заключено, что класс (марка) бетона в оставшихся частях выбитых колонн здания – В22,5 (М 300).

Таким образом, прочность бетона в оставшихся частях железобетонных колонн по ряду Б (оси 21 и 37) и по ряду В (ось 11) в здании ТСЦ-4 соответствовала проектным маркам.

Фундаменты колонн – железобетонные, монолитные. Так как грунтовые воды в районе строительства агрессивные по отношению к бетону и арматуре, материалы конструкций фундаментов (бетон и арматура) приняты соответствующими требованиям [6–8].

Металлические колонны порталов, расположенные на расстоянии 10 м от выбиваемой колонны, установлены на увеличенные с дополнительным армированием фундаментов существующих железобетонных колонн по осям 13 и 25 ряда В (рис. 7) и по осям 23 и 39 ряда Б (последние, по ряду Б, были выполнены на буронабивных сваях Ø 350 мм). Кроме того, для передачи горизонтальных усилий на уровне чистого пола в работу ростверков по осям 23 и 39 ряда Б была включена горизонтальная плита толщиной 300 мм.

Металлические колонны порталов, расположенные на расстоянии 5 м от выбиваемой колонны, были установлены на заново выполненные по проекту самостоятельные железобетонные монолитные ступенчатые фундаменты.

Проверочные расчеты элементов портала

Конструкции портала были рассчитаны на нагрузки [9] от их собственного веса и на суммарные нагрузки от выбиваемых колонн на уровне верха портала. Для определения несущей способности элементов портала здания ТСЦ-4 был использован сертифицированный вычислительный комплекс SCAD 11.1, разработанный в фирме «ТОПАЗ-ИНФОРМ», г. Киев.

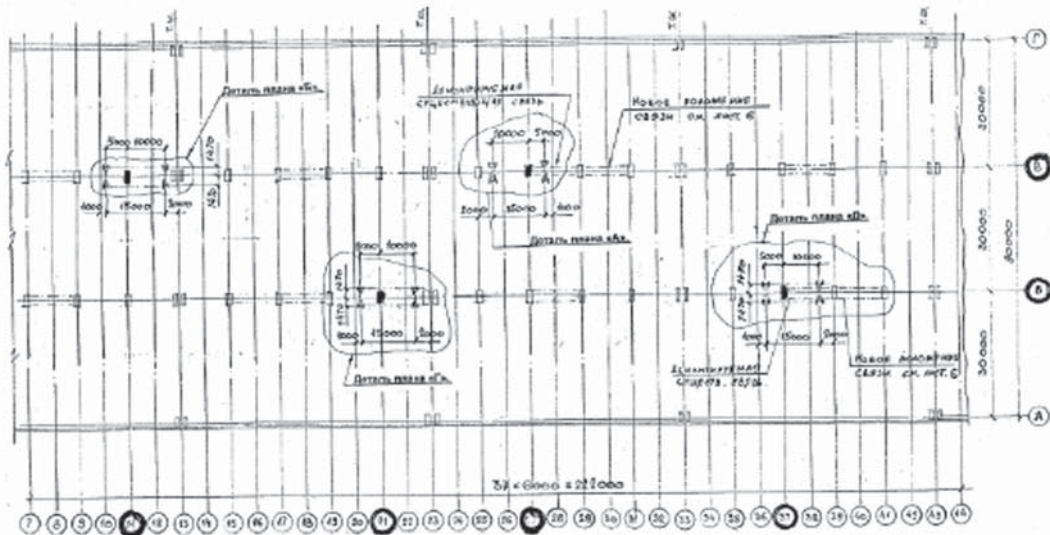


Рис. 1. План здания ТСЦ-4 с отмеченными местами выбивки колонн
Fig. 1. Plan of the TSTs-4 building with marked locations of the column demolition

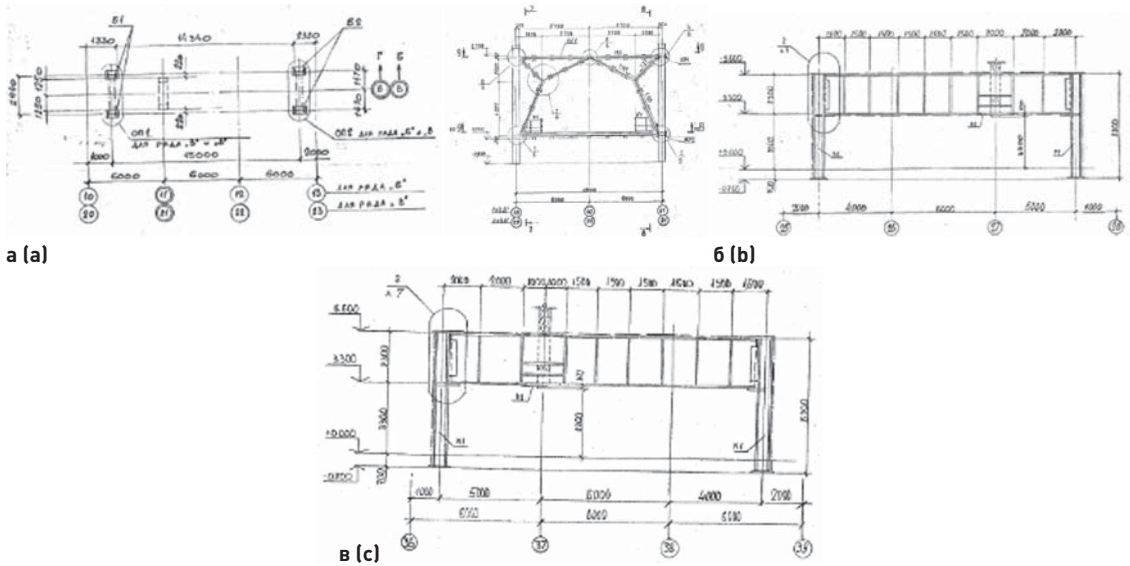


Рис. 2. Порталы под колонны: а – В11 и В21; б – В27; в – В37
Fig. 2. Column-replacing portals: а – В11 and В21; б – В27; в – В37



Рис. 3. Порталы в здании ТСЦ-4 по ряду В (вид из пролета Б-В) в местах выбитых колонн: а – В21; б – В37
Fig. 3. Portals in the TSCs-4 building along the row В (view from the В-В span) in locations of demolished columns: а – В21; б – В37



Рис. 4. Опираение на портал верхних частей вырубленной колонны В21 и передача нагрузки с покрытия здания ТСЦ-4 через верхнюю часть колонны В21 на балку портала (вид со стороны ряда В)
Fig. 4. Upper parts of the demolished В21column, supported by the portal and the load, transferred from the TSCs-4 building roof through the upper part of the В21 column to the portal beam (view from the В row)



Рис. 5. Опираение на портал верхней части вырубленной колонны Б37
Fig. 5. Upper part of the demolished B37 column, supported by the portal



а (a) **б (b)** **в (c)**
Рис. 6. Портал в здании ТСЦ-4 по ряду В в месте выбитой колонны В11: а – вид из пролета Б–В; б – вид из пролета Г–В; в – опиновение на портал верхней части В11
Fig. 6. Portal in the TSTs-4 building along the B row in the location of the demolished B11 column: a – view from the Б–В span; b – view from the Г–В span; c – upper part of the B11 column, supported by the portal



Рис. 7. Устройство фундаментов колонны В27
Fig. 7. B27 column foundation

Методика расчета и выбор расчетной схемы

Так как размеры опорных конструкций (порталов) и геометрические характеристики сечений элементов всех четырех устанавливаемых в цехе порталов, а также места и способы приложения нагрузок на порталы под выбиваемые колонны здания ТСЦ-4 идентичны, проверочный расчет был проведен только для одного портала, устанавливаемого в осях 25–28 по ряду В.

Проверочный расчет несущей способности элементов портала был выполнен с помощью метода конечных элементов. Конечные элементы приняты в виде стержней, которые ограничиваются узлами, находящимися в начале и в конце стержневого элемента. Приложение граничных условий в узлах осуществлялось с помощью запрещения соответствующих степеней свободы.

Проверочный расчет портала в месте выбивки колонны 27 здания ТСЦ-4 проводился в соответствии с требованиями [5, 10–12]. Расчетные сечения элементов рамы соответствовали сечениям, принятым в проекте. Расчетное сопротивление материала колонн и ригеля принято для стали С255 равным $R_y = 2350 \text{ кг/см}^2$ в соответствии с указаниями действующих нормативных документов (рис. 8).

Расчетная схема портала представляла собой раму, стойки которой жестко закреплены в фундаментах и жестко соединены с ригелем портала. Рама – свободная: в уровне ригеля имеется возможность смещения в горизонтальной плоскости. Силовые воздействия прикладывались в виде сосредоточенной силы, приложенной в узле в месте выбивки колонны В27 (рис. 9).

Результаты расчетов

Расчет портала с металлическими колоннами между осями 25 и 28 по ряду В здания ТСЦ-4 ОАО «Тагмет» выполнен из условия нагружения ригеля такой нагрузкой, при которой в наиболее нагруженном сечении элемента портала возникает напряжение $\sigma = R_y$ (коэффициент использования сечения этого элемента будет равен 1,0). Расчетная схема портала при нагружении предельной нагрузкой представлена на рис. 8.

В результате расчета предельная нагрузка в узел В27 возникает в ригеле портала и получается $P_{\max} = 328 \text{ т}$ (рис. 8). Верхние узлы колонн портала воспринимают нагрузку только от части собственного веса ригеля (условно принята равной $0,0033 P_{\max}$ – со стороны оси 25 и $0,0067 P_{\max}$ – со стороны оси 28).

При этом коэффициент расчетной длины колонны свободной рамы, равный 1,0, был определен по формуле 69 [5]:

$$\mu = \sqrt{\frac{n + 0,56}{n + 0,14}},$$

$$\text{где } n = \frac{I_r \times l_c}{I_c \times l_r},$$

I_r и l_r – момент инерции сечения и длина ригеля соответственно;

I_c и l_c – момент инерции сечения и длина колонны соответственно.

Эпюры продольных и поперечных сил и изгибающих моментов от предельной нагрузки в ригеле и колоннах портала представлены на рис. 9.

В результате проверочного расчета установлено, что несущая способность обеих колонн и ригеля между ними обеспечена при нагрузке, равной $P_{\max} = 328 \text{ т}$. При этом в ригеле напряжение от изгибающего момента $M = 1012,43 \text{ тм}$ и (в этом же сечении) $N = 3,4 \text{ т}$ составляет $\sigma = 2345 + 5 \text{ кг/см}^2$



Рис. 8. Расчетная схема портала с указанием предельной нагрузки, местных осей элементов и граничных условий

Fig. 8. Portal calculation scheme, indicating the ultimate load, local element axes and boundary conditions

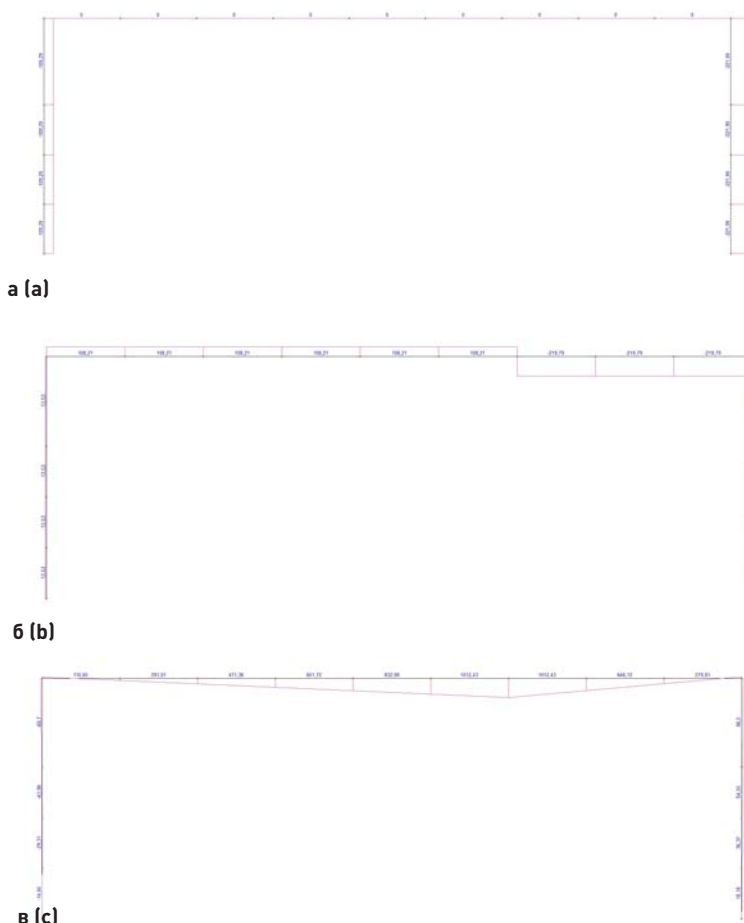


Рис. 9. Эпюры в элементах портала при предельной нагрузке: *а* – продольных сил (тс); *б* – поперечных сил (тс); *в* – изгибающих моментов (тсм)

Fig. 9. Diagrams of portal elements at the ultimate load: *a* – longitudinal forces (tf); *b* – transverse forces (tf); *c* – bending moments (tfm)

(при $R_y = 2350 \text{ кг/см}^2$), т. е. коэффициент использования сечения ригеля $\sigma/R_y = 1,0$. Предельная гибкость ригеля от максимального продольного усилия принята в соответствии с указаниями таблицы 19* [5] в зависимости от $\lambda = l \times \mu/r_x$; $\lambda = 1500 \times 1,0/84,95 = 18$ и $\varphi = 0,968$.

$$\alpha = \frac{N}{\varphi \times A_n \times R_y \times \gamma_c} = \frac{16790}{0,968 \times 688 \times 2350} = 0,011.$$

При $[\lambda] = 180 - 60\alpha = 179$.

В соответствии с данными проекта в верхнем жестком узле портала для расчета ригеля приняты: изгибающий момент $M = 225 \text{ тм}$ и продольное усилие $N = 30,7 \text{ т}$. При этих усилиях напряжение по прочности при совместном действии продольной силы и изгибающего момента в плоскости рамы в ригеле (балке) определяется по формуле 50 [5]:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{W_x} = \frac{30700}{688} + \frac{22500000}{43175} = 566 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \leq R_y \times \gamma_c = 2350 \text{ кг/см}^2,$$

т. е. коэффициент использования сечения ригеля составляет $566 \text{ кг/см}^2 / 2350 \text{ кг/см}^2 = 0,24$.

Таким образом, запас несущей способности запроектированного сечения ригеля (балки) составлял 76 % (при коэффициенте использования сечения 0,24).

Напряжение в правой колонне рамы достигало максимального значения при расчете ее на устойчивость в плоскости действия момента при внецентренном сжатии – при этом коэффициент использования сечения колонны был равен 0,97.

Учитывая, что элементы рамы работают линейно, при расчете правой колонны по прочности по формуле 50 [5] напряжение в колонне должно составить $566 \times 0,97 = 549 \text{ кг/см}^2$, что дает коэффициент использования сечения правой колонны $549 \text{ кг/см}^2 / 2350 \text{ кг/см}^2 = 0,23$.

Таким образом, запас несущей способности наиболее нагруженной (правой) колонны запроектированной рамы составлял 77 % (при коэффициенте использования сечения 0,23).

Вывод

Проверочный расчет рамы (портала) показал, что несущая способность ее элементов (колонн и ригеля) обеспечена.

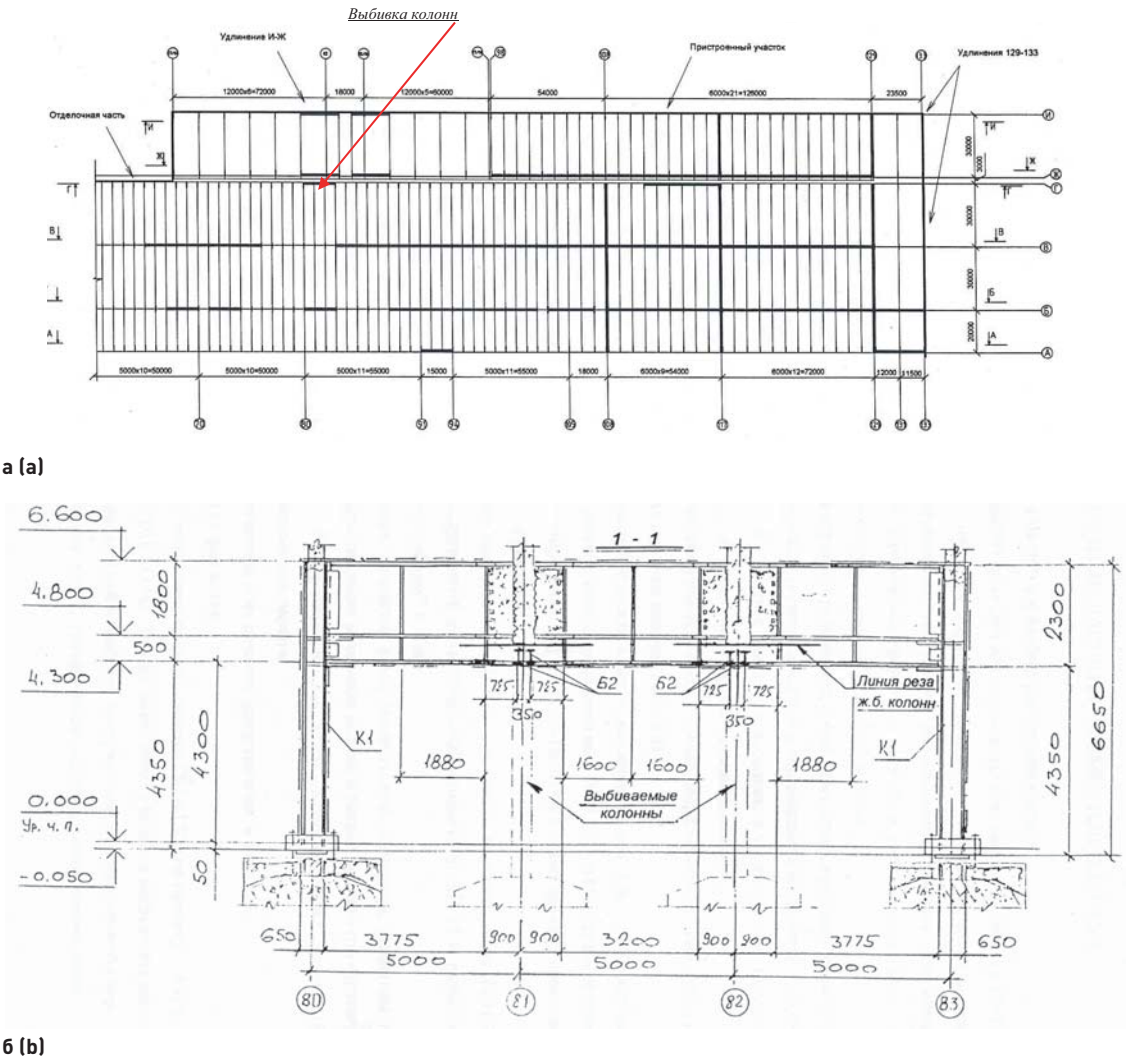
Конструктивные особенности опорных конструкций под выбиваемые колонны здания ТПЦ-1

Во время установки нового оборудования комплекса непрерывного стана PQF (2007 год) с целью увеличения шага колонн по ряду Г с 6 до 15 м (рис. 10а) в здании ТПЦ-1 ОАО «Тагмет» был возведен аналогичный описанному выше портал, выполняющий функции опорной конструкции под выбитые колонны Г81 и Г82 (рис. 10б).

Как и в здании ТСЦ-4, ригель портала в виде спаренной балки имел высоту 2,3 м, а двухветвевые металлические колонны были установлены снаружи существующих железобетонных колонн по оси 83 и по оси 80 (рис. 11) ряда Г. Ветви колонн были выполнены из сварных двутавров, решетка – из прокатного уголка. Полки балок портала расположены по двум уровням (на отм. +6,600 и +4,300) и связаны горизонтальными треугольными связями.

После временного закрепления двух колонн (Г81 и Г82) в портале путем омоноличивания верхней зоны опирания (и после набора бетоном расчетной прочности) была произведена отрезка и удаление нижних частей колонн. Остальные конструктивные особенности аналогичны порталам, установленным в здании ТСЦ-4.

В здании ТПЦ-1 были исследованы свойства существующих железобетонных колонн Г80 и Г83 и свойства фундаментов, вновь возведенных над существующими фундаментами, а также верхней части выбитой колонны Г82. Прочность бетона колонн определялась методом упругого отскока с использованием молотка Schmidt N-34 159590 фирмы PROCEQ в верхней части на доступных для обследования участках. Проведено 50 измерений в пяти элементах. Из анализа полученных материалов было определено, что класс (марка) бетона не ниже В20 (М 250) в существующих железобетонных колоннах Г80 и Г83 и во вновь возведенных фундаментах под колонны портала Г80 и Г83 здания ТПЦ-1, что соответствовало проектным маркам.



6 (b)

Рис. 10. а – Фрагмент плана здания ТПЦ-1 с указанием места выбивки колонн;
б – опорные конструкции (портал) под выбиваемые колонны Г81 и Г82 здания ТПЦ-1

Fig. 10. a – Fragment of the TPTs-1 building plan, indicating the location of demolished columns; **b** – support structures (portal), replacing demolished Г81 and Г82 columns of the TPTs-1 building

Проверочные расчеты элементов портала
Методика расчета и выбор расчетной схемы

Как и в здании ТСЦ-4, проверочный расчет для портала в здании ТПЦ-1, устанавливаемого по осям 80–83 по ряду Г, был проведен методом конечных элементов. Конечные элементы приняты в виде стержней, которые ограничиваются узлами, находящимися в начале и в конце стержневого элемента. Приложение граничных условий в узлах осуществлялось с помощью запрещения соответствующих степеней свободы.

Расчетная схема портала представляла собой раму, стойки которой шарнирно закреплены в фундаментах в горизонтальной и в вертикальной плоскостях. Соединение ригеля



Рис. 11. Конструкция портала в месте выбитых колонн Г81 и Г82 в пролете В–Г здания ТПЦ-1

Fig. 11. Portal structure in the location of demolished Г81 and Г82 columns in the В–Г span of the TPTs-1 building

с колонной – жесткое. Рама – несвободная: в уровне ригеля имелось шарнирное закрепление от смещения в горизонтальной плоскости.

Силовые воздействия прикладывались в виде сосредоточенных сил в узлах, действующих в местах выбивки колонн (Г80 и Г81).

Проверочный расчет портала в месте выбивки колонн Г80 и Г81 здания ТПЦ-1 проводился в соответствии с требованиями [5, 10–12].

Для определения несущей способности элементов портала здания ТПЦ-1 был использован сертифицированный вычислительный комплекс SCAD 11.1, разработанный в фирме «ТОПАЗ-ИНФОРМ», г. Киев (рис. 12).

Расчетные сечения элементов рамы соответствовали сечениям, принятым в проекте. Расчетное сопротивление материала колонн и ригеля было принято для стали С245 равным $R_y = 2447 \text{ кг/см}^2$ [4].

Результаты расчетов

Расчет портала с металлическими колоннами Г80 и Г83 в пролете В–Г здания ТПЦ-1 ОАО «Тагмет» был выполнен из условия нагружения ригеля такой нагрузкой, при которой в наиболее нагруженном сечении элемента портала возникает напряжение $\sigma = R_y$ (коэффициент использования сечения этого элемента будет равен 1,0). В результате расчета предельная нагрузка, принятая из условия, что коэффициент использования сечения равен 1,0, получилась $P_{\max} = 171 \text{ т}$ в каждый узел (Г81 и Г82). Узлы портала Г80 и Г83 воспринимали нагрузку только от части собственного веса ригеля (условно приняты равными $0,01 P_{\max}$). При этом коэффициент расчетной длины колонны несвободной рамы, равный 0,71, был определен по формуле:

$$\mu = \sqrt{\frac{1 + 0,46n}{1 + 0,93n}},$$

$$\text{где } n = \frac{I_r \times l_c}{I_c \times l_r},$$

I_r и l_r – момент инерции сечения и длина ригеля соответственно;

I_c и l_c – момент инерции сечения и длина колонны соответственно.
В результате проверочного расчета было установлено, что несущая способность обеих колонн (Г80 и Г83) и ригеля между ними обеспечена при нагрузке, равной $P_{\max} = 171$ т. При этом в ригеле напряжение составило $\sigma = 1884 \text{ кг/см}^2$ (0,77 % от $R_y = 2447 \text{ кг/см}^2$). В соответствии с данными проекта в верхнем жестком узле портала для расчета были приняты: изгибающий момент $M = 86,5$ тм и продольное усилие в колонне $Q = 115,7$ т. При этих усилиях напряжение по прочности при совместном действии продольной силы и изгибающего момента в плоскости рамы в сжато-изгибаемой стойке (колонне) определялось по формуле 50 [5]:

$$\sigma = \frac{N}{A_n} \pm \frac{M_x}{W_x} = \frac{115700}{296} + \frac{8650000}{6899} = 1645 \frac{\text{кг}}{\text{см}^2} \leq R_y \times \gamma_c.$$

При $R_y \times \gamma_c = 2447 \text{ кг/см}^2$ коэффициент использования в верхнем сечении колонны составил $1645/2447 = 0,68$.
Напряжение в колонне достигает максимального значения при расчете ее на устойчивость в плоскости действия момента при внецентренном сжатии – тогда коэффициент использования равен 1,0.

При расчете же колонны по прочности от усилий, полученных при предельной нагрузке, напряжение составило:

$$\sigma = \frac{170690}{296} + \frac{11383000}{6899} = 2227 \text{ кг/см}^2,$$

что дает дополнительный запас несущей способности сечения 9 % ($2227/2447 = 0,91$).
Таким образом, запас несущей способности колонн рамы составил 38 % ($1 - 0,68 \times 0,91 = 0,38$), а ригеля (при коэффициенте использования 0,77) – 49 %.

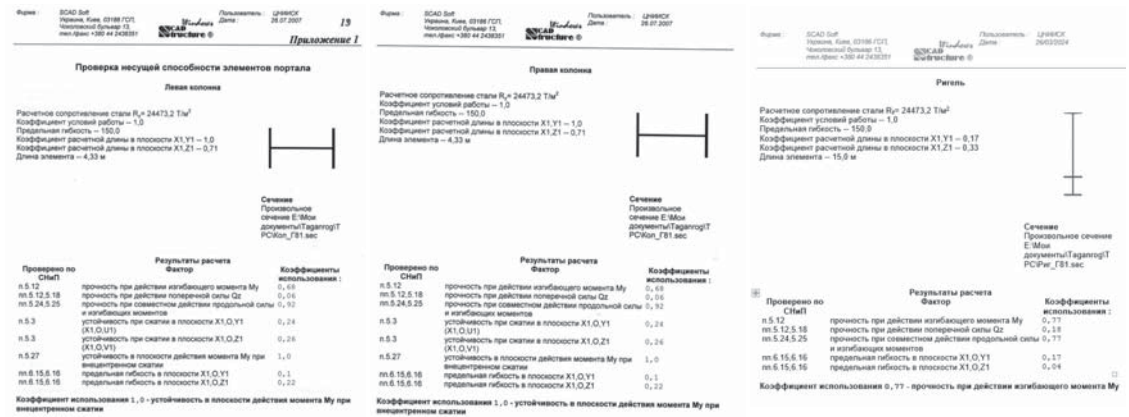


Рис. 12. Определение коэффициентов использования элементов портала Г81
Fig. 12. Determination of the utilization factor for Г81 portal elements

Вывод

Проверочный расчет рамы (портала) показал, что несущая способность ее элементов (колонн и ригеля) обеспечена. Коэффициент использования сечения колонны составил $0,62 < 1,0$; коэффициент использования сечения ригеля составил $0,52 < 1,0$.

Конструктивные особенности опорной конструкции под выбиваемую колонну Д16' металлургической части здания ТПЦ-2

В пролетах С–Д и Д–Е металлургической части здания ТПЦ-2 во время перевооружения возникла необходимость увеличения шага колонн по ряду Д в осях 13'–19' с 18 до 24 м. Для этого потребовалось демонтировать подкрановую часть колонны Д16' и установить новые колонны по осям 14' и 18' по ряду Д (рис. 13).

В качестве опорной конструкции под выбиваемую колонну был установлен жесткий в двух направлениях портал, состоящий из ригеля (одновременно выполняющего функции подкрановых балок) в виде спаренной балки высотой 2,472 м и металлических колонн, устанавливаемых на расстоянии 6 м от существующих по осям 13' и 19' колонн по ряду Д (рис. 14). Ригель представлял собой две подкрановые балки из сварных двутавров, полки которых соединены изнутри листами $t = 36$ мм. Кроме того, в 6 м от опор между балками были предусмотрены диафрагмы жесткости.

Подкрановые части заново возводимых колонн – двухветвевые – были выполнены из сварных двутавров, соединенных по стенкам листом $t = 20$ мм. Надкрановые части колонн по осям 14' и 18' сплошные, из сварного двутавра, высотой до уровня головки рельса (рис. 15). Сохраняемая надкрановая ветвь колонны по оси 16' в основании была укреплена и соединена со стенками устанавливаемых подкрановых балок с помощью вертикальных и горизонтальных ребер жесткости толщиной $t = 36$ и 25 мм.

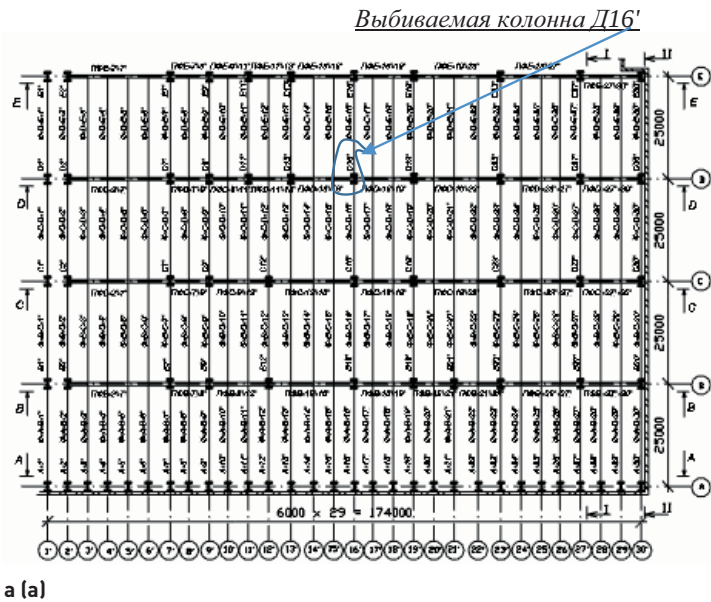
В промежутки между осями 19'–18' и 14'–13' были установлены обрезанные и подготовленные к опиранию на новые колонны части демонтированных подкрановых балок (с тормозными конструкциями) с пролетов 19'–16' и 13'–16'.

Конструкции были рассчитаны на нагрузки от кровли, покрытия, снега, собственного веса конструкций подкрановых балок и крановые нагрузки.

Все металлические конструкции портала были из стали С245 (колонны и промежуточные ребра балок), С255 (опорные ребра) и С345-3 (стенки и полки подкрановых балок) по ГОСТ 27772-88 [4] в соответствии с требованиями строительных норм [5].

Все заводские соединения – на сварке, монтажные соединения – на сварке и на болтах нормальной точности класса прочности 5.8 по ГОСТ 7798-70* [13].

В процессе проведения экспертизы во время перевооружения цеха визуальному осмотру подвергались конструктивные элементы опорной конструкции под частично демонтированную колонну Д16' здания ТПЦ-2: металлические колонны; металлические балки ригеля и металлические связи и поперечные балки в уровне ригеля; фундаменты колонн, а также стропильные фермы и горизонтальные связи покрытия (рис. 16) в осях 13'–19' вдоль ряда Д.



б (b)



в (c)

Рис. 13. а – План колонн в металлургической части ТПЦ-2 с указанием места выбиваемой колонны.

Установленные новые колонны по осям 14' и 18' по ряду Д в пролетах С–Д и Д–Е металлургической части здания ТПЦ-2 на месте демонтированной колонны Д16': б – со стороны ряда С; в – со стороны ряда Е

Fig. 13. а – Plan of columns in the metallurgical section of TPTs-2, indicating the location of the demolished column. Columns, installed along the axes 14' and 18' in the row D of C–D and D–E spans in the metallurgical section of the TPTs-2 building instead of the demolished D16' column: б – from the C row; в – from the E row

Проверочные расчеты элементов портала
Методика расчета и выбор расчетной схемы

Проверочный расчет несущей способности элементов портала, поддерживающего оголовок колонны Д16', был выполнен строительными отделами ГП «Укрگیпромез» с помощью метода конечных элементов. Конечные элементы были приняты в виде стержней, которые ограничивались узлами, находящимися в начале и в конце стержневого элемента. Приложение граничных условий в узлах осуществлялось с помощью запрещения соответствующих степеней свободы.

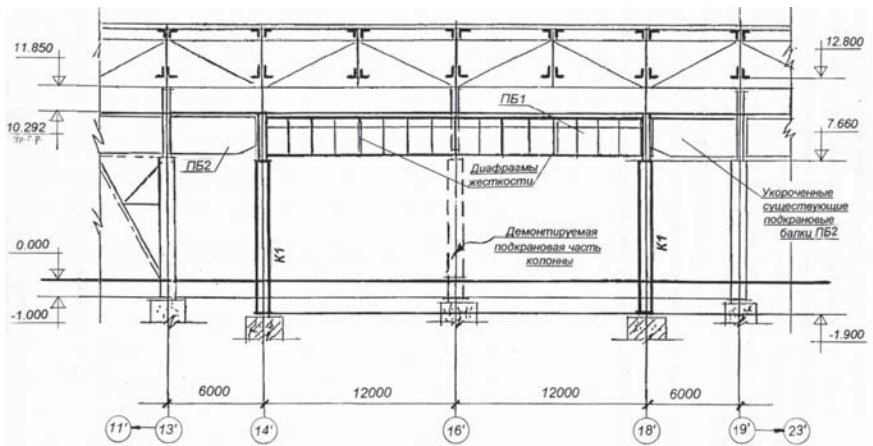


Рис. 14. Схема портала в месте выбивки колонны Д16' здания ТПЦ-2

Fig. 14. Scheme of the portal, replacing the demolished Д16' column of the TPTs-2 building



Рис. 15. Подкрановые балки портала в месте опирания оставшейся верхней части колонны Д16'

Fig. 15. Crane beams at the support point of the remaining upper Д16' column part



Рис. 16. Стропильные фермы и связи покрытия здания ТПЦ-2 над колонной портала Д18'

Fig. 16. Main trusses and roof braces of the TPTs-2 building above the Д18' portal column

Расчетная схема портала представляла собой раму, стойки которой шарнирно закреплены в фундаментах и шарнирно соединены с ригелем портала. Балки ригеля портала в раме одновременно выполняли функции подкрановых балок. Рама – свободная: в уровне ригеля имела возможность смещения в горизонтальной плоскости.

Кроме того, отдельно был проверен блок подкрановых балок ригеля ПБ1 на вертикальные и горизонтальные нагрузки. При расчете блока были использованы оболочечные четырехугольные элементы (№ 44), входящие в состав вычислительного комплекса SCAD, что дало возможность получить величины напряжений, возникающих в блоке.

Силовые воздействия от покрытия здания были представлены в виде сосредоточенной силы, приложенной в узле в месте выбивки колонны Д16'. Вертикальные и горизонтальные в продольном и поперечном направлениях нагрузки от воздействия четырех кранов прикладывались к подкрановой балке в трех вариантах.

Проверочный расчет портала в месте выбивки колонны Д16' здания ТПЦ-2 проводился в соответствии с требованиями [5, 10–12].

Для определения несущей способности элементов портала здания ТПЦ-2 был использован сертифицированный вычислительный комплекс SCAD 11.1, разработанный в фирме «ТОПАЗ-ИНФОРМ», г. Киев.

Расчетное сопротивление материала для колонн из стали С245 принято равным $R_y = 2450 \text{ кг/см}^2$, а для балок из стали С345-3 – $R_y = 3050 \text{ кг/см}^2$ в соответствии с указаниями [5].

Результаты расчетов

В результате проведенных ГП «Укрگیпромез» расчетов получены напряжения в элементах балок и колонн, прогибы и другие необходимые данные для оценки прочности и устойчивости конструкций.

Наибольшие нормальные напряжения от наиболее невыгодного сочетания нагрузок в стенке балки достигали $\sigma = 2402 \text{ кг/см}^2$, в верхней полке – $\sigma = 1455 \text{ кг/см}^2$ и в нижней полке – $\sigma = 1415 \text{ кг/см}^2$ (при $R_y = 3050 \text{ кг/см}^2$), в колонне при горизонтальном воздействии (торможении) слева – $\sigma = 1165 \text{ кг/см}^2$, при торможении справа – $\sigma = 1152 \text{ кг/см}^2$ (при $R_y = 2450 \text{ кг/см}^2$).

Коэффициент использования сечения (σ/R_y) балки портала по прочности при совместном действии продольной силы и изгибающих моментов составил 0,56; колонн – 0,46; 0,47.

Таким образом, в результате проверочного расчета было установлено, что несущая способность элементов портала (колонн и ригеля, совмещающего функции подкрановой балки) при проектной нагрузке обеспечена.

Нижняя часть оставшейся после вырубki надкрановой части колонны Д16' была прикреплена к стенке подкраново-подстропильной балки с помощью ребра толщиной 25 мм. К полке сечения колонны (с двух сторон) ребро крепилось сварными швами длиной $l = 1000 \text{ мм}$, которые при этом испытывали изгиб от момента, появляющегося от поперечного торможения, и от момента, приходящего с покрытия цеха.

$$M = M_t + M_n = 9000 \text{ кг} \times 1,156 \text{ м} + 33000 \text{ кгм} = 43404 \text{ кгм}.$$

Момент сопротивления расчетного сечения этого сварного шва (с двух сторон) при ручном выполнении на монтаже с катетом 12 мм:

$$W_f = \beta_f \times I_f / y_n = 0,7 \times 2 \times 100^3 \times 1,2 / 12 \times 50 = 2800 \text{ см}^3,$$

где y_n – расстояние от центра тяжести до нижнего сечения шва.

Напряжение в шве:

$$\tau_f = M / W_f = 4340400 / 2800 = 1550 \text{ кг/см}^2,$$

$$\tau_f / R_{wf} = 1550 / 2200 = 0,7,$$

где R_{wf} – расчетное сопротивление металла шва сварного соединения элементов из стали С345-3 с угловыми швами, выполненное ручным способом электродами Э50А (проволокой марки Св-08Г2С).

Таким образом, при катете шва, равном 12 мм, напряжение условного среза в соединении составило 70 % от расчетного сопротивления.

Железобетонные фундаменты

Металлические колонны портала монтировались на вновь возводимые фундаменты, устанавливаемые в заранее укрепленные котлованы в соответствии с проектом, разработанным ОАО «Донецкшахтострой» и ДП ГХК «Донбассшахтострой», с учетом существующих подземных сооружений в условиях работающего цеха.

На основании данных инженерно-геологического заключения под площадкой дымовой трубы ТПЦ-2 расчетное сопротивление грунта в основании фундаментов было принято $R_0 = 350$ кПа (3,5 кг/см²).

Фундаменты под колонны портала – отдельно стоящие железобетонные монолитные столбчатые ступенчатые – устанавливались в заранее укрепленные котлованы с учетом существующих стенок подземных сооружений и коммуникаций (рис. 17).

Расчетные характеристики бетона и арматуры приняты в соответствии с требованиями [6]. Поскольку грунтовые воды являются агрессивными по отношению к бетону и арматуре конструкций, для фундаментов колонн был применен бетон класса В16*, марки W6 по водонепроницаемости, на портландцементе по ГОСТ 10178-85 [14] с содержанием в клинкере C_3S не более 65 %, C_3A не более 7 %, $C_3A + C_4AF$ не более 22 % или на шлакопортландцементе.

Наружные поверхности фундаментов, соприкасающиеся с грунтом, были обмазаны горячим битумом за 2 раза.

Представленные проектные решения фундаментов обеспечивали восприятие фундаментами всех прикладываемых к ним нагрузок. Надежность железобетонных фундаментов колонн портала, установленного в месте выбивки колонны Д16' здания ТПЦ-2, была обеспечена.

Выводы

Проверочный расчет рамы (портала) под выбиваемой колонной Д16' в здании ТПЦ-2, проведенный ГП «Укргипромет», показал, что несущая способность элементов портала (колонн и ригеля) обеспечена.

Конструктивное оформление закрепления оставшейся надкрановой части вырубленной колонны между вновь устанавливаемыми подкраново-подстропильными балками надежно.



а (a)



б (b)

Рис. 17. Фундаменты портала под колонны: а – Д18'; б – Д14'
Fig. 17. Foundations of the portal under columns: а – Д18'; б – Д14'

Заключение

При проведении экспертизы проектов конструкций порталов в местах выбивки четырех колонн по ряду Б (оси 21 и 37) и по ряду В (оси 11 и 27) здания ТСЦ-4, проекта конструкций портала в местах выбивки двух колонн в пролете В–Г вдоль ряда Г (оси 80–83) здания ТПЦ-1 и на основании результатов технического диагностирования конструкции металлургической части здания трубопрокатного цеха № 2 ОАО «Тагмет» и портала в месте выбитой колонны Д16' сотрудниками ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко были выполнены:

- необходимые проверочные расчеты колонн и балок ригеля порталов (в месте выбивки колонны В27 ТСЦ-4, колонн Г80 и Г83 ТПЦ-1 и колонны Д16' металлургической части ТПЦ-2) с помощью сертифицированного вычислительного комплекса SCAD 11.1 фирмы «ТОПАЗ-ИНФОРМ», г. Киев;
- визуальный осмотр и инструментальное обследование конструкций зданий, подлежащих модернизации;
- экспертная оценка надежности запроектированных конструкций.

В результате проведенной экспертизы установлено, что проекты конструкций порталов в местах выбивки колонн в зданиях ТСЦ-4, ТПЦ-1 и металлургической части ТПЦ-2 выполнены в соответствии с требованиями современных строительных норм и правил. Прочность и устойчивость порталов в целом и их отдельных элементов **обеспечена**. Дефекты и повреждения, превышающие значения, установленные действующими нормативными документами, и влияющие на эксплуатационную пригодность зданий, **не выявлены**.

Проектные решения были успешно реализованы при реконструкции цехов ОАО «Тагмет» под новое оборудование.

Список литературы

1. РД 11-589-03. Положение о проведении экспертизы промышленной безопасности опасных металлургических и коксохимических производственных объектов. Москва: НТЦ «Промышленная безопасность»; 2004.
2. Ведяков И.И., Фарфель М.И., Гукова М.И., Кондрашов Д.В., Яровой С.Н. Обследование конструкций зданий и сооружений завода ОАО «Тагмет». Строительная механика и расчет сооружений. 2013;(1):58–64.
3. Ведяков И.И., Урицкий М.Р., Гукова М.И., Фарфель М.И., Донченко О.Н. Экспертиза промышленной безопасности в обеспечении долговременной эксплуатации зданий и сооружений. ТЭК. Безопасность объектов топливно-энергетического комплекса. 2013;(2):126–130.
4. ГОСТ 27772-88. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2006.
5. СНиП II-23-81*. Стальные конструкции. Нормы проектирования. Москва: Центральный институт типового проектирования; 1990.
6. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва; 2004.
7. СНиП 2.02.01-83*. Основания зданий и сооружений. Москва: ФГУП ЦПП; 2006.
8. СНиП 3.02.01-87. Земляные сооружения, основания и фундаменты. Москва: ФГУП ЦПП; 2007.
9. СНиП 2.01.07-85*. Нагрузки и воздействия. Москва: ФГУП ЦПП; 2005.
10. Пособие по проектированию стальных конструкций (к СНиП II-23-81*). Москва: Центральный институт типового проектирования; 1989.
11. СП 53-102-2004. Общие правила проектирования стальных конструкций. Москва; 2005.
12. СНиП 3.03.01-87. Несущие и ограждающие конструкции. Москва: ФГУП ЦПП; 2007.

13. ГОСТ 7798-70*. Болты с шестигранной головкой класса точности В. Конструкция и размеры. Москва: Стандартинформ; 2010.
14. ГОСТ 10178-85. Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия. Москва: ИПК Издательство стандартов; 2005.

References

1. RD 11-589-03. Regulations on the examination of industrial safety of hazardous metallurgical and coke-chemical production facilities". Moscow: STC "Industrial Safety"; 2004. (In Russian).
2. Vedyakov I.I., Farfel M.I., Gukova M.I., Kondrashov D.V., Yarovoy S.N. Inspection of structures of buildings and structures of the Tagmet plant. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2013;(1):58–64. (In Russian).
3. Vedyakov I.I., Uritsky M.R., Gukova M.I., Farfel M.I., Donchenko O.N. Industrial safety expertise in ensuring long-term operation of buildings and structures. Fuel and energy complex. Bezopasnost' ob"ektov toplivno-energeticheskogo kompleksa = Safety of facilities of the fuel and energy complex. 2013;(2):126–130. (In Russian).
4. State Standard 27772-88. Rolled products for structural steel constructions. General specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2006. (In Russian).
5. SNiP II-23-81*. Steel structures. Design standards. Moscow: Central Institute standard design; 1990. (In Russian).
6. SNiP 52-01-2003. Concrete and reinforced concrete structures. Principal rules. Moscow; 2004. (In Russian).
7. SNiP 2.02.01-83*. Soil bases of buildings and structures. Moscow: FSUE CCI; 2004. (In Russian).
8. SNiP 3.02.01-87. Earthworks, foundations and foundations. Moscow: FSUE CCI; 2007. (In Russian).
9. SNiP 2.01.07-85*. Loads&actions. Moscow: FSUE CCI; 2005. (In Russian).
10. Manual on the design of steel structures (to SNiP II-23-81*). Moscow: Central Institute of Standard Design; 1989. (In Russian).
11. SP 53-102-2004. General rules for steel structure design. Moscow; 2005. (In Russian).
12. SNiP 3.03.01-87. Load-bearing and enclosing structures. Moscow: FSUE CCI; 2007. (In Russian).
13. State Standard 7798-70*. Hexagon bolts, product grade B. Construction and dimensions. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. (In Russian).
14. State Standard 10178-85. Portland cement and portland blastfurnace slag cement. Specifications. Moscow: Publishing house of standards; 2005. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Маргарита Ильинична Гукова, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией нормирования, реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: Gukova.Rita@yandex.ru

тел.: 8 (499) 170-10-87

Margarita I. Gukova, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Laboratory Head, Laboratory for Reconstruction, Standardization and Monitoring of Unique Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: Gukova.Rita@yandex.ru

tel.: 8 (499) 170-10-87

Михаил Иосифович Фарфель , канд. техн. наук, заведующий лабораторией нормирования, реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: farfelmi@yandex.ru

тел.: +7 (499) 170-10-87

Mikhail I. Farfel✉, Cand. Sci. (Engineering), Laboratory Head, Laboratory for Reconstruction, Standardization and Monitoring of Unique Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Metal and Wooden Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: farfelmi@yandex.ru
tel.: +7 (499) 170-10-87

Дмитрий Владимирович Кондрашов, ведущий научный сотрудник лаборатории нормирования, реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: dkondras@mail.ru
тел.: 8 (499) 174-73-25

Dmitry V. Kondrashov, Leading Researcher, Laboratory for Reconstruction, Standardization and Monitoring of Unique Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: dkondras@mail.ru
tel.: 8 (499) 174-73-25

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.012.4

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-61-68](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-61-68)

EDN: HLQFZJ

ВЛИЯНИЕ ПЕТЛЕВЫХ СТЫКОВ АРМАТУРЫ НА ПРОЧНОСТЬ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

С.А. ЗЕНИН, канд. техн. наук

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. Опыт применения петлевых соединений рабочей арматуры в изгибаемых железобетонных элементах показывает сокращение трудозатрат при устройстве на строительной площадке арматурных каркасов. Однако анализ имеющихся результатов исследований показал, что они проводились преимущественно для изгибаемых элементов, в связи с этим были проведены дополнительные экспериментальные исследования по оценке влияния различных типов конструктивных решений петлевых стыков арматуры на прочность нормальных сечений внецентренно сжатых железобетонных элементов.

Целью выполненного исследования являлось получение результатов экспериментальных исследований и оценка влияния конструктивных решений петлевых стыков арматуры на прочность железобетонных внецентренно сжатых элементов.

Материалы и методы. Исследования проводились на основе результатов испытаний внецентренно сжатых железобетонных элементов с петлевыми стыками рабочей арматуры. В рамках исследований было испытано 7 серий опытных образцов с различными конструктивными решениями петлевых стыков, общее количество образцов в исследовании – 22.

Результаты. Результатом работы является выявленная степень влияния конструктивных решений петлевых стыков арматуры на прочность внецентренно сжатых железобетонных элементов – в среднем от 3 до 14 % в зависимости от конструктивного решения петлевого стыка.

Выводы. Установлено, что проектирование внецентренно сжатых элементов следует выполнять с учетом конструкции петлевого стыка продольной арматуры.

Ключевые слова: железобетон, конструкции, прочность, жесткость, трещиностойкость, петлевой стык арматуры, внецентренно сжатый элемент

Для цитирования: Зенин С.А. Влияние петлевых стыков арматуры на прочность внецентренно сжатых железобетонных конструкций. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):61–68. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-61-68](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-61-68)

Вклад авторов

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

Финансирование

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

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 11.04.2024

Поступила после рецензирования 25.04.2024

Принята к публикации 02.05.2024

EFFECT OF LOOP REINFORCEMENT JOINTS ON THE STRENGTH OF ECCENTRICALLY COMPRESSED REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

S.A. ZENIN, Cand. Sci. (Engineering)

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

Abstract

Introduction. Using loop joints of working reinforcement in flexural reinforced concrete members reduces labor costs when installing reinforcement cages at the construction site. However, the analysis of the available research showed that they were carried out mainly for flexural members. In this regard, additional experimental studies were carried out to assess the effect of various types of design solutions of loop reinforcement joints on the strength of normal sections of eccentrically compressed reinforced concrete elements.

Aim. To obtain the results of experimental studies and assess the effect of design solutions of loop reinforcement joints on the strength of eccentrically compressed reinforced concrete elements.

Materials and methods. The research involved the results of tests of eccentrically compressed reinforced concrete elements with loop joints of working reinforcement. As part of the research, 7 series of samples with different design solutions of loop joints were tested. The total number of samples in the research comprised 22 items.

Results. The research revealed the effect of design solutions of loop reinforcement joints on the strength of eccentrically compressed reinforced concrete elements – on average from 3 to 14 %, depending on the design solution of the loop joint.

Conclusions. It was found that the design of eccentrically compressed elements should be carried out taking into account the design of the loop joint of longitudinal reinforcement.

Keywords: reinforced concrete, structures, strength, stiffness, cracking resistance, loop reinforcement joint, eccentrically compressed element

For citation: Zenin S.A. Effect of loop reinforcement joints on the strength of eccentrically compressed reinforced concrete structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):61–68. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-61-68](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-61-68)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

The study was carried out within the framework of contractual works of JSC Research Center of Construction and Federal Autonomous Institution "Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment in Construction" (FAU "FCC").

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 11.04.2024

Revised 25.04.2024

Accepted 02.05.2024

Введение

В последнее время в железобетонных конструкциях находят применение петлевые соединения рабочей арматуры. Применение таких соединений снижает трудоемкость изготовления арматурных каркасов на строительной площадке.

Анализ имеющихся результатов исследований петлевых соединений рабочей арматуры [1–7] показал, что они проводились преимущественно для изгибаемых элементов. Применение таких соединений в сжатых конструкциях требовало дополнительного обоснования.

Целью настоящего исследования являлась оценка на основании анализа результатов экспериментальных исследований влияния на прочность железобетонных внецентренно сжатых элементов конструктивных решений петлевых стыков арматуры.

Материалы и методы

Оценка влияния различных конструктивных решений петлевых стыков на прочность нормальных сечений внецентренно сжатых железобетонных элементов выполнена по результатам выполненных в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева экспериментальных исследований опытных образцов [8].

Были рассмотрены результаты испытаний 7 серий опытных образцов по 3–4 образца-близнеца в каждой серии.

В качестве контрольных были приняты результаты испытаний образцов базовой серии без петлевых стыков (серия К.1). Образцы с петлевыми соединениями были предусмотрены нескольких типов: серия К.2 – с перехлестом петлевых стыков без прямой вставки (т. е. без прямых участков стыкуемых стержней арматуры в зоне стыка), серии К.3 и К.4 – с прямой вставкой в петлевом стыке длиной соответственно $5d_s$ и $10d_s$ (d_s – диаметр продольной арматуры); серии К.5, К.6 и К.7 – с установкой поперечной арматуры в зоне петлевого стыка без прямой вставки и с прямой вставкой длиной $5d_s$ и $10d_s$ соответственно. Петлевые стыки арматуры располагались в средней части опытных образцов.

Детально конструктивные решения опытных образцов, а также методика их испытаний описаны в работе [8].

Результаты

По результатам выполненного анализа установлена степень влияния конструктивных решений петлевых стыков на прочность нормального сечения внецентренно сжатых элементов.

В результате анализа опытных данных выявлено следующее. Установлено, что разрушение всех образцов происходило по нормальному сечению с раздроблением бетона в сжатой зоне при достижении напряжений в растянутой арматуре физического предела текучести. В контрольных образцах (серия К.1 – образцы без петлевых стыков арматуры) разрушение сопровождалось выпучиванием стержней сжатой арматуры.

Опытные значения разрушающих нагрузок для образцов-близнецов во всех сериях оказались близки между собой – отклонение не превышает 13 % (рис. 1а).

Разброс опытных разрушающих нагрузок для образцов серии К.1 составил не более 8 %.

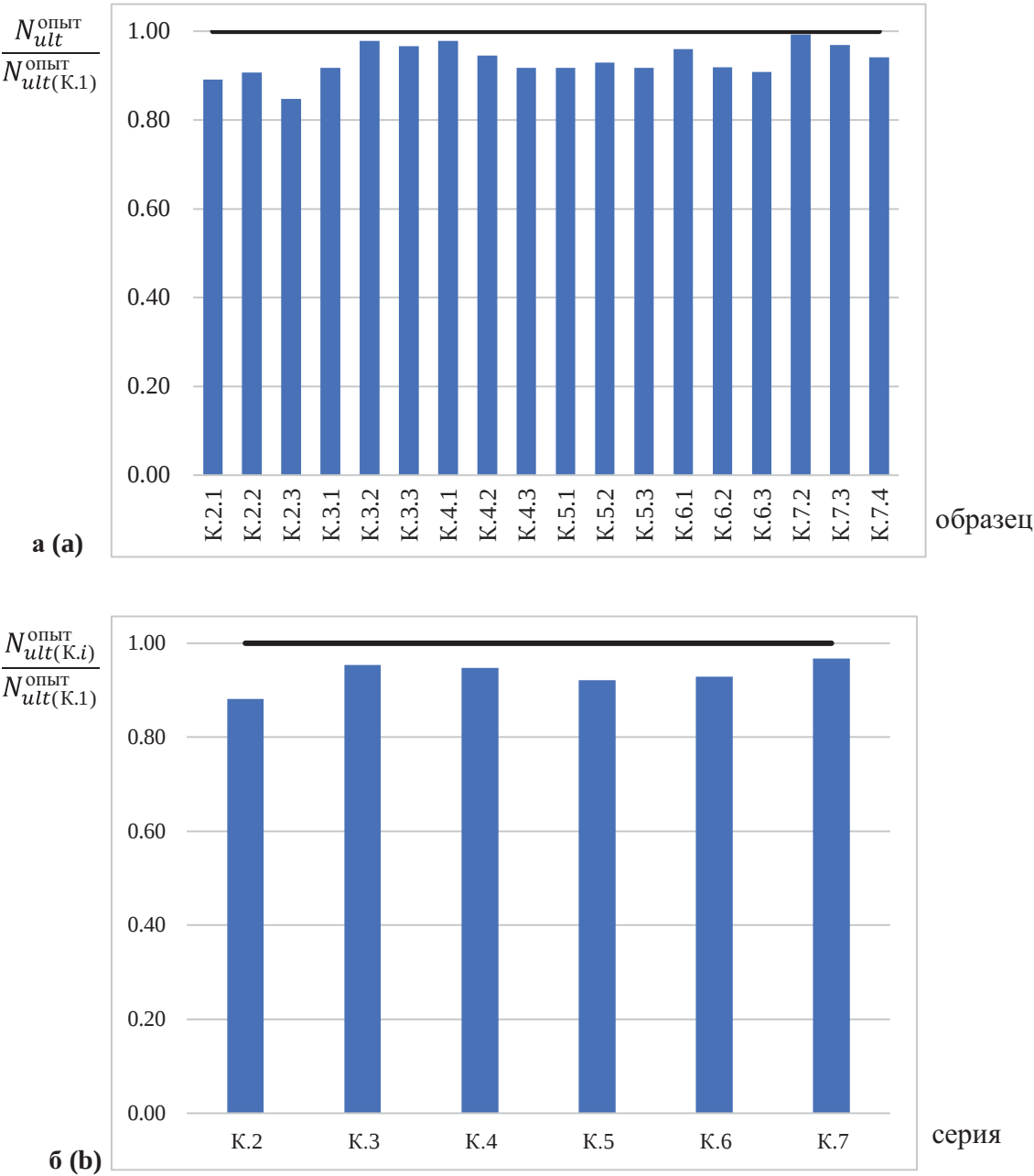


Рис. 1. Отношение разрушающей нагрузки образцов с петлевыми стыками (а) и усредненных внутри серии образцов разрушающих нагрузок (б) к усредненному значению разрушающей нагрузки контрольных образцов серии К.1

Fig. 1. Ratio of the ultimate load of samples with loop joints (a) and ultimate load samples averaged within the series (b) to the average value of the ultimate load of control samples of the K.1 series

Разброс опытных разрушающих нагрузок для образцов серии К.2 составил не более 7%. Среднее по этой серии опытное значение разрушающей нагрузки оказалось на 12% ниже ее среднего опытного значения для контрольных образцов серии К.1 (рис. 1б). Таким образом, можно увидеть, что конструктивное решение петлевого стыка без прямой вставки в явном виде снижает прочность нормального сечения при внецентренном сжатии.

Средние значения опытной разрушающей нагрузки образцов каждой из серий К.3–К.7 оказались ниже среднего опытного значения образцов серии К.1 на 3–8%. В целом по сериям К.3–К.7 среднее значение разрушающей нагрузки образцов оказалось ниже ее среднего значения для контрольных образцов серии К.1 на 6%.

Согласно результатам испытаний устройство прямой вставки в петлевом стыке приводит к повышению разрушающей нагрузки образцов серии К.3 в среднем на 8%, а серии К.4 – на 7% по сравнению с образцами серии К.2. Установка поперечной арматуры в зоне петлевого стыка без прямой вставки (серия К.5) повышает разрушающую нагрузку в среднем на 5% по сравнению с образцами серии К.2. Дополнительная установка поперечной арматуры в зоне петлевого стыка с прямой вставкой практически не повлияла на величину разрушающей нагрузки: ее повышение составило 5% для стыка с длиной прямой вставки $5d_s$ (серия К.6) и 10% – с длиной $10d_s$ (серия К.7).

Сравнение среднего значения опытной разрушающей нагрузки образцов с петлевыми стыками без прямой вставки и с прямой вставкой показало, что введение прямой вставки приводит к увеличению несущей способности нормального сечения в зоне стыка. При этом увеличение длины прямой вставки приводит к повышению прочности образцов, однако она все равно ниже прочности образцов без петлевых стыков.

Установлено, что наличие поперечной арматуры в стыке без прямой вставки (сравнение образцов серии К.2 и К.5) незначительно увеличивает несущую способность – всего на 5%. Аналогичная ситуация наблюдается при увеличенной длине прямой вставки (образцы серии К.4 и К.7) – увеличение на 2%. Сравнивая образцы серии К.3 и К.6, можно отметить несколько негативное влияние установленной поперечной арматуры: среднее значение разрушающей нагрузки для серии К.6 ниже на 3% аналогичных образцов без поперечной арматуры серии К.3. Возможно, данный эффект связан с более пластичной схемой разрушения образцов серии К.3, т. к. наблюдается различная картина трещинообразования при разрушении данных серий, о чем будет упомянуто отдельно.

Расчетные значения разрушающих нагрузок опытных образцов определяли согласно [2] по фактическим характеристикам материалов и фактическим размерам поперечных сечений элементов. Расчетные значения разрушающих нагрузок опытных образцов с петлевыми стыками всех серий определяли как для элементов без соединений.

Сопоставление результатов расчетов с опытными данными (рис. 2) показало следующее.

Для образцов серии К.1 отношение опытных разрушающих нагрузок к их расчетным значениям изменялось от 0,93 до 1,09. Среднее для серии отношение составило 0,99.

Для образцов серии К.2, выполненных с перехлестом петлевых стыков арматуры без прямой вставки, отношение опытных и расчетных разрушающих нагрузок изменялось от 0,84 до 0,9, а среднее отношение для серии составило 0,86. Для образцов серий К.3–К.7 с прямой вставкой и (или) с поперечными стержнями арматуры в зоне петлевого стыка отношение опытных разрушающих нагрузок к их расчетным значениям изменялось от 0,91 до 1,06, среднее отношение для образцов всех этих серий составило 0,97.

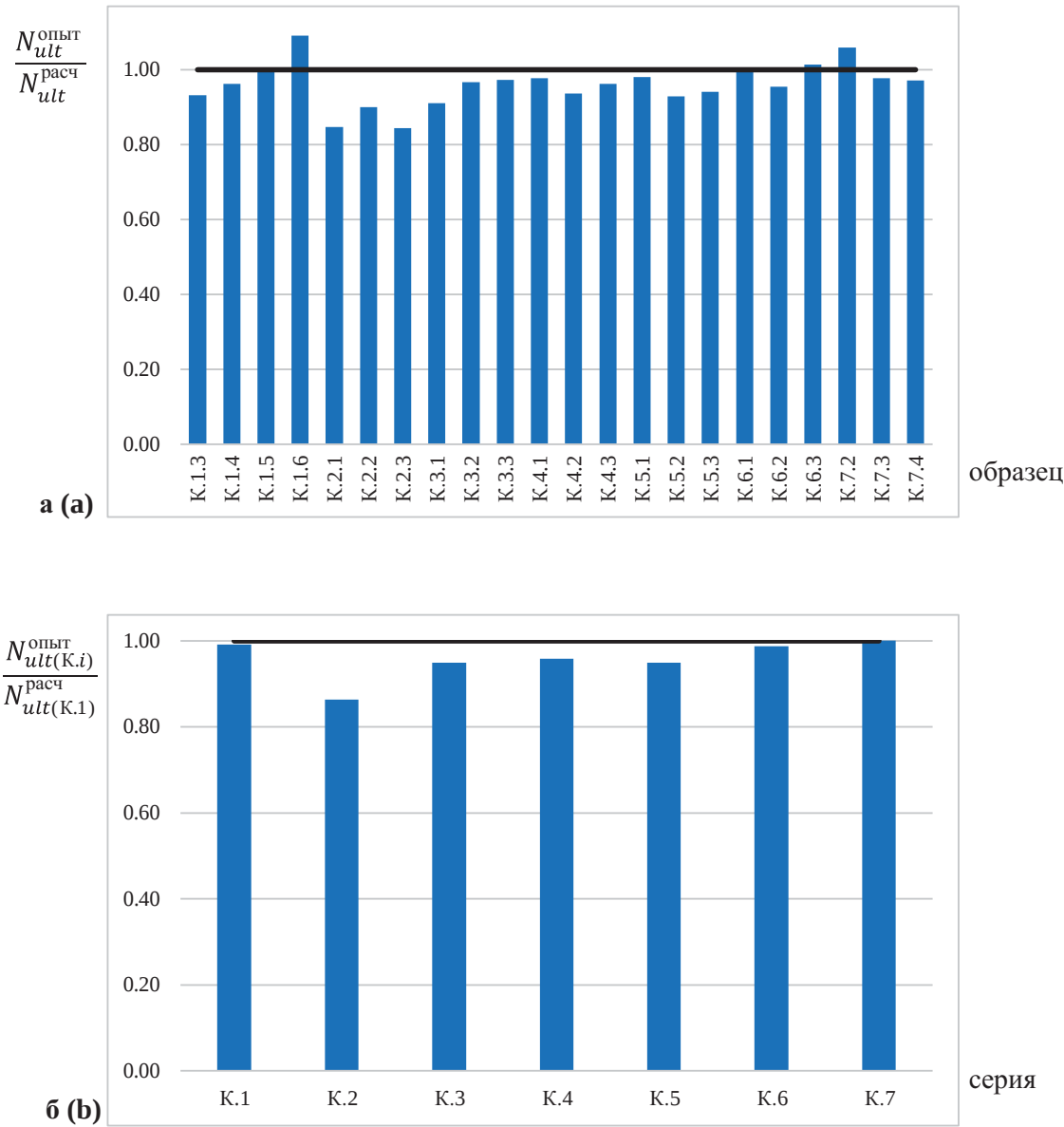


Рис. 2. Соотношение опытных и расчетных значений разрушающей нагрузки образцов серий К.1–К.7 (а) и усредненных внутри серии образцов опытных разрушающих нагрузок к усредненному значению расчетной нагрузки контрольных образцов серии К.1 (б)

Fig. 2. The ratio of the experimental and design values of the ultimate load of K.1–K.7 series samples (a) and averaged within the series of samples of experimental ultimate loads to the average value of the design load of control K.1 series samples (b)

Таким образом, по результатам испытаний можно отметить, что устройство в сжатых элементах петлевых стыков без прямой вставки или без дополнительной поперечной арматуры в зоне стыка приводит к снижению их прочности в сравнении с прочностью образцов без петлевых стыков.

Вывод

По результатам исследования установлено, что конструкция петлевого стыка продольной арматуры оказывает влияние на прочность нормальных сечений внецентренно сжатого элемента по сравнению с аналогичными конструкциями без такого стыка. Для исследованных образцов с петлевыми стыками арматуры опытные значения разрушающих нагрузок ниже, чем для образцов без стыков. Петлевые стыки без прямой вставки показали наименьшую несущую способность. Введение прямой вставки приводит к некоторому увеличению несущей способности, однако по сравнению с базовыми образцами (без петлевых стыков) она все равно ниже.

Установка поперечной арматуры в ряде случаев может привести к увеличению несущей способности, но незначительно. При этом значения опытных разрушающих нагрузок все равно ниже значений для базовых образцов. В отдельных случаях установка поперечной арматуры меняет схему разрушения, что приводит, наоборот, к незначительному, но все-таки снижению разрушающей нагрузки по сравнению с образцами без нее.

Введение прямой вставки в петлевой стык и увеличение ее длины приводит к увеличению несущей способности нормального сечения внецентренно сжатого элемента. Однако, несмотря на это, а также на установку дополнительной поперечной арматуры, для всех образцов с петлевыми стыками несущая способность ниже, чем без них.

На основании полученных результатов можно рекомендовать при проектировании внецентренно сжатых железобетонных конструкций с петлевыми стыками продольной рабочей арматуры предусматривать устройство прямой вставки длиной не менее $5d_s$ либо установку поперечной арматуры в зоне петлевого стыка диаметром не менее $0,5d_s$ и в количестве не менее двух хомутов. При соблюдении этих условий расчет прочности нормальных сечений может выполняться в соответствии с требованиями действующих норм. С целью апробации данного решения его рекомендуется учесть в СП 430.1325800.2018 [9].

Список литературы

1. Николаев В.Б., Горбов В.А., Белов А.А., Климов Е.А., Лисичкин С.Е. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций АЭС с модифицированными петлевыми стыками на крупномасштабных железобетонных моделях балочного типа. Безопасность энергетических сооружений. 2016;(1):66–81.
2. Николаев В.Б., Рубин О.Д., Селезнев С.В. Расчет прочности и конструирование петлевых стыков сборных элементов. Бетон и железобетон. 1987;(1):38–40.
3. Климов Е.А., Николаев В.Б. Совершенствование методики расчета промышленных бессварных петлевых стыков арматуры железобетонных конструкций ГЭС и АЭС по предельным состояниям. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2016;(5):3–10.
4. Авдеев К.В., Мамин А.Н., Бобров В.В., Бамматов А.А., Квасников А.А., Мартынов К.В., Пугачев Б.А. Испытания элементов железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры. Промышленное и гражданское строительство. 2023;(6):24–30. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.24-30>
5. Малахов В.В. Испытания балок с петлевыми стыками многократно повторяющимися нагрузками. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2015;(60):195–201.
6. Дорофеев В.С., Шеховцов И.В., Петраш С.В., Малахов В.В. Прочность и деформативность балок со стыком «Передерия». В: Ресурсоекономні матеріали, конструкції, будівлі та споруди: зб. наук. праць. Вип. 22. Рівне; 2011, с. 328.

7. Дорощев В.С., Малахов В.В. К вопросу о напряженно-деформируемом состоянии петлевых стыков изгибаемых элементов. Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури. 2014;(54):104–109.
8. Зенин С.А., Кудинов О.В., Кудяков К.Л., Юрин Е.Ю., Хлебников С.К. Прочность нормальных сечений внецентренно сжатых железобетонных конструкций с петлевыми стыками арматуры. Подготовка и проведение экспериментальных исследований. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;39(4):28–38. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4\(39\)-28-38](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4(39)-28-38)
9. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2019.
10. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. Москва: Стандартинформ; 2019.

References

1. Nikolaev V.B., Gorbov V.A., Belov A.A., Klimov E.A., Lisichkin S.E. Experimental studies of reinforced concrete structures of nuclear power plants with modified loop joints on large-scale reinforced concrete models of beam type. Bezopasnost' energeticheskikh sooruzhenii = Safety of power structures. 2016;(10):66–81. (In Russian).
2. Nikolaev V.B., Rubin O.D., Seleznev S.V. Strength calculation and construction of loop joints of prefabricated elements. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 1987;(1):38–40. (In Russian).
3. Klimov E.A., Nikolaev V.B. Improving the methodology for calculating industrial welded loop joints of reinforcement of reinforced concrete structures of hydroelectric power plants and nuclear power plants according to limit conditions. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2016;(5):3–10. (In Russian).
4. Avdeev K.V., Mamin A.N., Bobrov V.V., Bammatov A.A., Kvasnikov A.A., Martyanov K.V., Pugachev B.A. Testing of elements of reinforced concrete structures with looped joints of reinforcement. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2023;(6):24–30. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.06.24-30>
5. Malakhov V.V. Tests of beams with loop joints with repeatedly repeated loads. Bulletin of the Odessa State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2015;(60):195–201. (In Russian).
6. Dorofeev V.S., Shekhovtsov I.V., Petrash S.V., Malakhov V.V. Strength and deformability of beams with a joint "Perederia". In: Rusurseeconomic materials, structures, buildings and ponds: Collection of scientific works. Iss. 22. Rivne; 2011, pp. 328. (In Russian).
7. Dorofeev V.S., Malakhov V.V. On the issue of the stress-deformable state of loop joints of bent elements. Bulletin of the Odessa State Academy of construction and architecture. 2014;(54):104–109. (In Russian).
8. Zenin S.A., Kudinov O.V., Kudyakov K.L., Yurin E.Yu., Khlebnikov S.K. Normal section strength of eccentrically compressed reinforced concrete structures with loop reinforcement joints. Experimental studies. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2023;39(4):28–38. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4\(39\)-28-38](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-4(39)-28-38)
9. SP 430.1325800.2018. Monolithic structural systems. Design rules. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
10. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Updated version of SNiP 52-01-2003. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Сергей Алексеевич Зенин, канд. техн. наук, заведующий лабораторией теории железобетона и конструктивных систем, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lab01@mail.ru

Sergey A. Zenin, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of the Theory of Reinforced Concrete Structures and Structural Systems, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lab01@mail.ru

УДК 004.942

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-69-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-69-78)

EDN: HUYCFE

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ РАСЧЕТОВ СОЕДИНЕНИЙ АНИЗОТРОПНЫХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Н.В. КОЛЕСНИКОВ✉

М.В. АРИСКИН, канд. техн. наук

Д.О. МАРТЫШКИН

А.В. МЕРКУШОВ

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, ул. Германа Титова, д. 28, г. Пенза, 440028,
Российская Федерация

Аннотация

Введение. Современные методы проектирования и расчета строительных конструкций часто ограничиваются упругой стадией работы материалов. Для анализа напряженно-деформированного состояния соединений необходимо учитывать свойства материала, а также его работу под нагрузкой, включая как упругие, так и нелинейные стадии. Значительный интерес представляют анизотропные материалы, такие как древесина. Теоретическое и практическое исследование работы деревянных образцов представлено в данной работе.

Целью данной работы является выполнение натурных испытаний и численное моделирование для анализа напряженно-деформированного состояния и совершенствования расчетов анизотропных конструкционных материалов.

Материалы и методы. Выполнены натурные испытания деревянных образцов из сосны второго сорта на сжатие вдоль волокон с фиксацией вертикальных напряжений сжатия и деформаций. Испытания выполнены на гидравлическом прессе с максимальной нагрузкой 50 т. Для фиксации деформаций и напряжений использовалось тензометрическое оборудование. На основе данных натурных испытаний выполнено численное моделирование образцов в программных комплексах ЛИРА-САПР и ANSYS.

Результаты. Согласно результатам натурных испытаний, упругая стадия работы древесины при сжатии находится в диапазоне до 90 кН, после чего наблюдается переход к пластической деформации. Выполнено численное моделирование образцов в программных комплексах ЛИРА-САПР и ANSYS, которое показало сходимость результатов. Однако программный комплекс ANSYS позволяет более детально моделировать и рассчитывать соединения и конструкции. Сравнение распределений вертикальных напряжений сжатия σ_v , полученных в результате натурных испытаний и численного моделирования в программном комплексе ANSYS, показало сходимость результатов (невязка не превышает 5%). Это подтверждает эффективность использования данного программного комплекса для моделирования соединений анизотропных материалов.

Выводы. Результаты натурных испытаний и численного моделирования показали эффективность применения программного комплекса ANSYS для расчета сложных соединений анизотропных конструкционных материалов. Сходимость результатов достигнута для упругой стадии. Для моделирования пластической стадии необходимы дополнительные исследования.

Ключевые слова: анизотропные материалы, соединение, моделирование, программный комплекс ANSYS

Для цитирования: Колесников Н.В., Арискин М.В., Мартышкин Д.О., Меркушов А.В. Совершенствование расчетов соединений анизотропных конструкционных материалов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):69–78. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-69-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-69-78)

Вклад авторов

Колесников Н.В. – сбор и анализ результатов натурных испытаний, выполнение расчетов, написание текста научной статьи.

Арискин М.В. – постановка задач научной работы, анализ результатов научной работы.
Мартышкин Д.О., Меркушов А.В. – выполнение натурных испытаний и анализ полученных данных.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.11.2023

Поступила после рецензирования 16.04.2024

Принята к публикации 18.04.2024

IMPROVED CALCULATIONS OF JOINTS IN ANISOTROPIC STRUCTURAL MATERIALS

N.V. KOLESNIKOV✉

M.V. ARISKIN, Cand. Sci. (Engineering)

D.O. MARTYSHKIN

A.V. MERKUSHOV

Penza State University of Architecture and Construction, German Titov str., 28, Penza, 440028, Russian Federation

Abstract

Introduction. Contemporary methods for the design and calculation of building structures are often limited to the elastic stage of the material work. In order to analyze the stress-strain state of joints, it is necessary to take into account the properties of the material, as well as its operation under the load, including both elastic and non-linear stages. In this case, anisotropic materials, e.g. wood, represent a particular interest. Therefore, the paper presents a theoretical and practical study of the work, performed by wooden samples.

Aim. To perform tests and numerical simulations for analyzing the stress-strain state and improve the calculations of anisotropic structural materials.

Materials and methods. Compression tests of wooden samples, made of second-grade pine, were carried out along the fibers with fixed vertical compression stresses and strains. The tests were performed using a hydraulic press with a maximum load of 50 t. Strain gauge equipment was used to record strains and stresses. Based on the data of compression tests, the numerical simulation of the samples in the LIRA-SAPR and ANSYS software packages was performed.

Results. According to the test results, the elastic stage of the compressed wood ranges up to 90 kN, followed by a transition to the plastic deformation. The performed numerical simulation of the samples in the LIRA-SAPR and ANSYS software packages demonstrated the convergence of the results. However, the ANSYS software package allows for a more detailed simulation and calculation of joints and structures. The comparison of distributions of vertical compression stresses σ_y , obtained in tests and ANSYS software package numerical simulation, proved the convergence of the results (discrepancy of less than 5 %). This confirms the effectiveness of using this software package for simulating the joints of anisotropic materials.

Conclusions. The results of tests and numerical simulation showed the effectiveness of using the ANSYS software package to calculate complex joints of anisotropic structural materials. The convergence of the results is established for the elastic stage. An additional study is required to simulate the plastic stage.

Keywords: anisotropic materials, joint, simulation, ANSYS software package

For citation: Kolesnikov N.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O., Merkushov A.V. Improved calculations of joints in anisotropic structural materials. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):69–78. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-69-78](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-69-78)

Authors contribution statement

Kolesnikov N.V. – collection and analysis of test results, calculations, manuscript writing.

Ariskin M.V. – setting the tasks of the scientific work, analysis of results.

Martyshkin D.O., Merkushov A.V. – conduct of tests and analysis of the obtained data.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 13.11.2023

Revised 16.04.2024

Accepted 18.04.2024

Введение

Благодаря развитию научно-технического прогресса, усовершенствованию мощности и производительности электронно-вычислительных машин (ЭВМ), а также развитию и доступности расчетных программных комплексов стало доступно моделирование сложных соединений анизотропных конструкционных материалов. Наиболее распространенным является создание объемных конечно-элементных моделей конструкций и соединений в программных комплексах (ПК) ЛИРА-САПР и ANSYS [1–3].

Для анализа напряженно-деформированного состояния (НДС) соединения при нагружении необходимо рассматривать упругие и нелинейные стадии работы материала. В современной практике строительства расчет соединений и конструкций производится в упругой стадии без учета пластических деформаций.

Далее на основе натурных испытаний и численного моделирования рассмотрим стадии работы материала.

Экспериментальная часть

Для определения данных стадий необходимо провести натурные испытания образцов. Для этого были изготовлены деревянные бруски с размерами $50 \times 50 \times 200$ (h) мм из сосны второго сорта.

Испытания производились на гидравлическом прессе П-500 (рис. 1а). Нагружение образцов производилось непрерывно со скоростью 2 кН/мин. Для равномерного распределения нагрузки на торец образца устанавливалась дополнительная оснастка (рис. 1а). Для определения нормальных напряжений сжатия на поверхность образцов наклеены тензорезисторы, подключенные к комплекту для тензометрии (рис. 1б). Испытания проводились до полного разрушения образцов (рис. 1в).

Специфика оборудования предполагает собой нагружение образца до величины 5 кН, после чего нагружение производится непрерывно, с изначально заданной скоростью. Фиксация



а (a)

б (b)

в (c)

Рис. 1. Испытание деревянных образцов на сжатие: а – образец в прессе П-500; б – общий вид образца; в – общий вид разрушения образца

Fig. 1. Compression tests of wooden samples: а – sample in the P-500 press; б – general view of the sample; в – general view of the sample destruction

напряжения производилась после приложения нагрузки в 5 кН, что необходимо учитывать при построении графиков нормальных напряжений, полученных при численном моделировании.

Графики относительных деформаций образцов представлены на рис. 2, согласно которому упругая стадия работы материала находится в диапазоне до 90 кН, в связи с чем напряжения сжатия образцов рассматриваем в упругой стадии.

Далее рассмотрим методику создания объемных конечно-элементных моделей в программных комплексах ANSYS и ЛИРА-САПР.

В ПК ANSYS образец замоделирован как объемное тело (solid), которому были заданы свойства древесины, учитывающие ортотропию материала. Нижняя грань образца зафиксирована через граничные условия опоры типа fixed support (жесткое защемление) (рис. 3а). У верхней грани образца замоделирована стальная пластина, на которую приложена вертикальная нагрузка, по аналогии с натурными испытаниями. Контакт между поверхностями

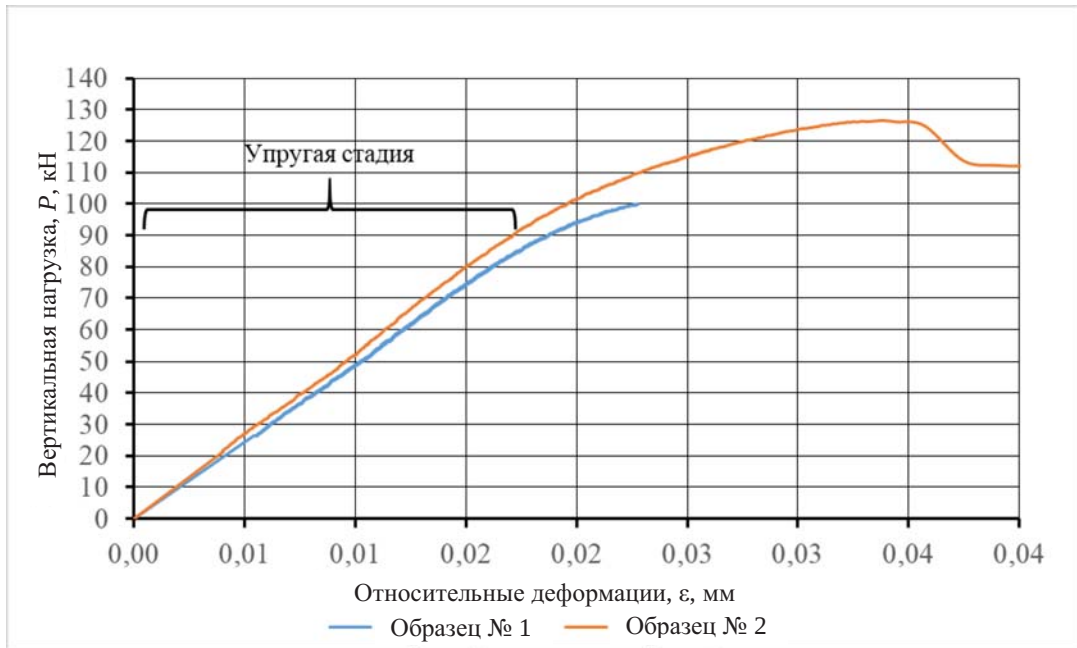


Рис. 2. Относительные деформации образца
Fig. 2. Sample strain

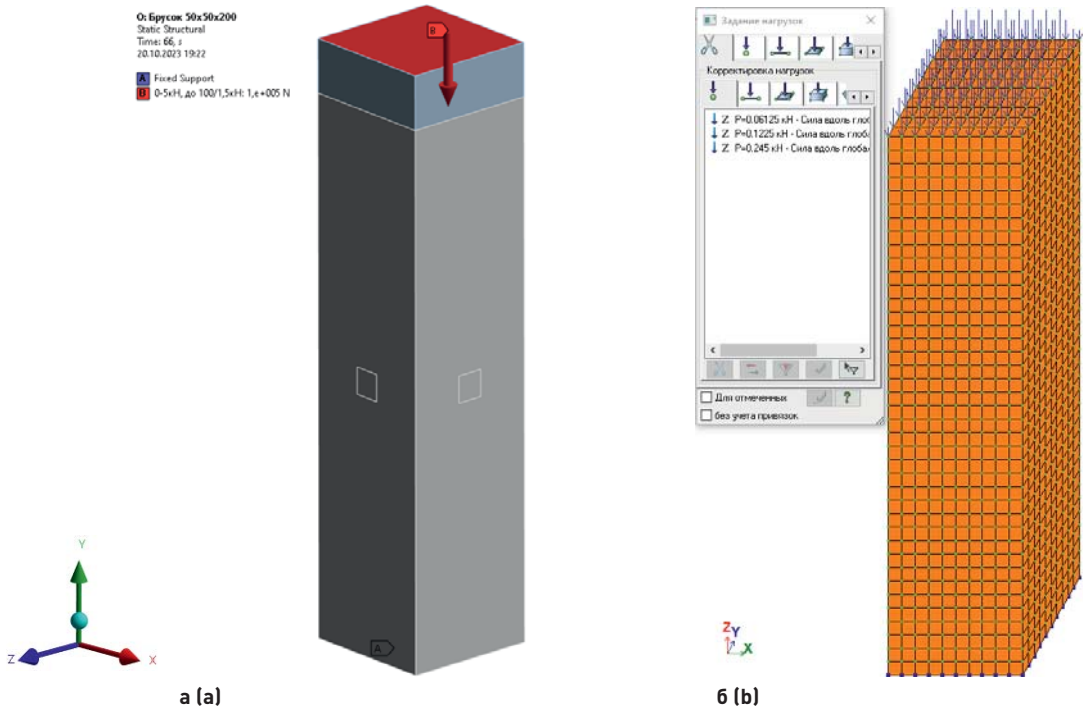


Рис. 3. Объемная конечно-элементная модель образца в ПК ANSYS (a) и ЛИРА-САПР (б)
Fig. 3. Volumetric finite element model of the sample in the ANSYS SP (a) and LIRA-SAPR SP (b)

древесины и стали определен как bonded (моделирование жесткого клеевого соединения). Следует отметить, что всплесками напряжения в углах образца можно пренебречь (рис. 3а), так как в реальном образце напряжения возникают равномерно по всему объему тела.

В ПК ЛИРА-САПР брусок замоделирован объемными конечными элементами КЭ 36, которому присвоены характеристики древесины, учитывающие ортотропию материала в местной системе координат. В узлах нижней грани образца заданы связи, ограничивающие перемещения вдоль оси z , и связи по трем углам, дополнительно ограничивающие перемещения по осям x , y и xu (рис. 3б). Нагрузка приложена к узлам верхней грани через систему условных единиц, учитывающих грузовую площадь каждого узла, для исключения деформации верхних углов образца.

Для достижения сходимости результатов натурных испытаний и численного моделирования образцов были введены корректирующие коэффициенты, учитывающие реальный модуль упругости материала, также для сопоставления результатов был определен коэффициент чувствительности тензорезисторов.

Для оценки результатов испытаний и моделирования было проведено определение фактического модуля упругости древесины на основе испытаний на четырехточечный изгиб брусков размерами $30 \times 30 \times 200$ мм (рис. 4). Проведенные испытания образцов показали значения определяемых характеристик, близкие к значениям, приведенным в СП 64.13330.2017 [4]. На этом основании при моделировании и расчете принимались табличные значения расчетных характеристик древесины сосны второго сорта.

Далее представлены результаты расчета в ПК ANSYS и ЛИРА-САПР: перемещения и напряжения сжатия (рис. 5–7).



Рис. 4. Испытание деревянных образцов на четырехточечный изгиб

Fig. 4. Four point bend testing of wooden samples

По результатам численного моделирования образцов (рис. 5–7) установлена сходимость полученных данных (погрешность не превышает 5%) при нагружении образцов сосредоточенной нагрузкой 25–30 кН. Для дальнейшего изучения соединений конструкций и материалов мы будем использовать программный комплекс ANSYS. Этот комплекс имеет обширную базу данных, которая позволяет выполнять моделирование различных клеевых соединений, учитывать трение материала, возможность ступенчатого и длительного нагружения.

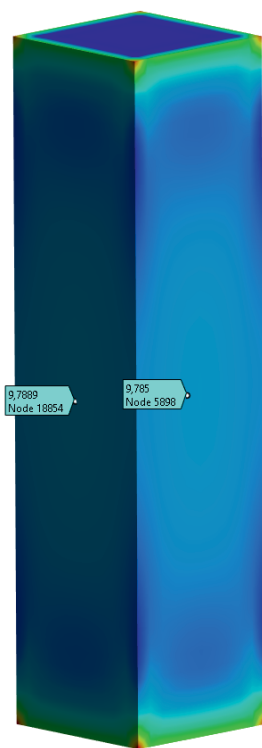
На основе результатов натурных испытаний и компьютерного моделирования образцов построены графики распределения вертикальных напряжений сжатия σ_y (рис. 7). Как отмечено ранее, специфика оборудования предполагает собой нагружение образца до величины 5 кН, что отображено на рис. 7.

Согласно рис. 7, установлена сходимость результатов натурных испытаний и компьютерного моделирования (погрешность не превышает 5%), что подтверждает правильность создания объемной конечно-элементной модели образцов.

Для моделирования пластической работы материала и соединения необходимы дополнительные исследования, введение дополнительных коэффициентов, задание дополнительных контактных связей, то есть моделирование образцов с применением теории разрушения. На данной стадии моделирования соединения конструкций рассматриваются в упругой стадии работы материала.

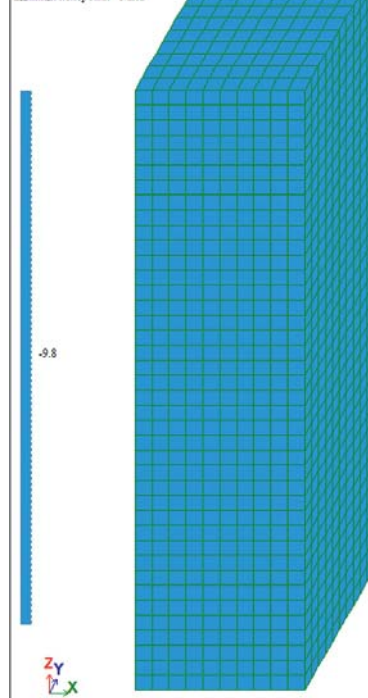
0: Брусек 50x50x200
Дерево
Type: Equivalent (von-Mises) Stress
Unit: MPa
Time: 15 s
20.10.2023 19:46

12.67 Max
12.276
11.883
11.489
11.096
10.702
10.308
9.9148
9.5212
9.1276 Min



а (а)

До 1 т
Мозаика напряжений по Nz
Единица измерения - МПа



б (б)

Рис. 5. Вертикальные напряжения сжатия при нагрузке 25 кН в ПК ANSYS (а) и ЛИРА-САПР (б)
Fig. 5. Vertical compression stresses at a load of 25 kN in the ANSYS SP (a) and LIRA-SAPR SP (b)

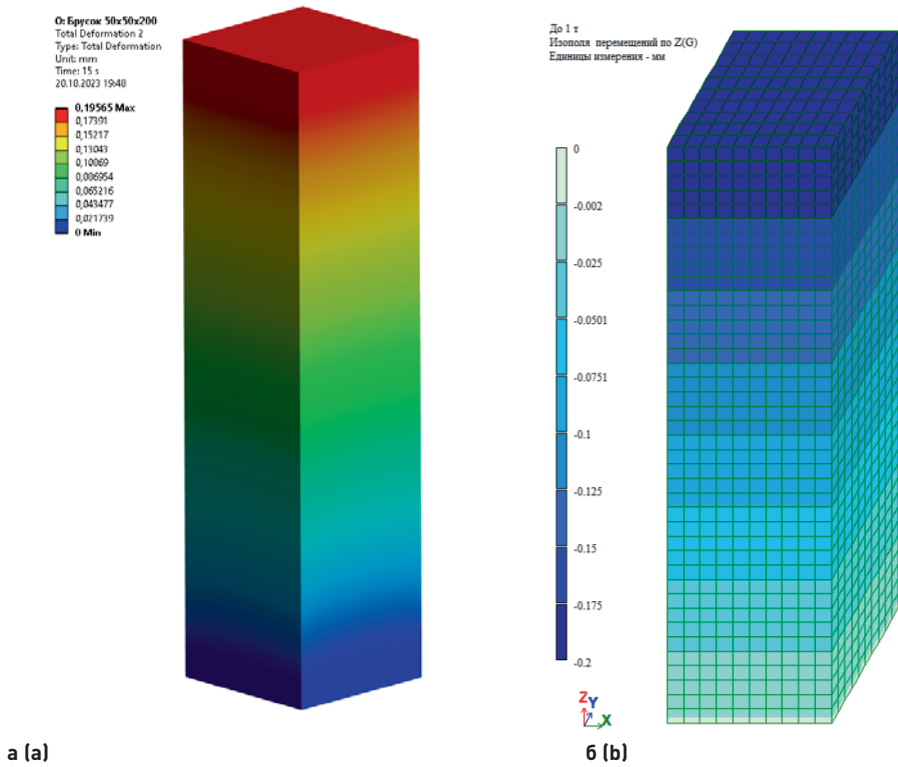


Рис. 6. Вертикальные перемещения при нагрузке 25кН в ПК ANSYS (а) и ЛИРА-САПР (б)
Fig. 6. Vertical movements at a load of 25кН in the ANSYS SP (a) and LIRA-SAPR SP (б)

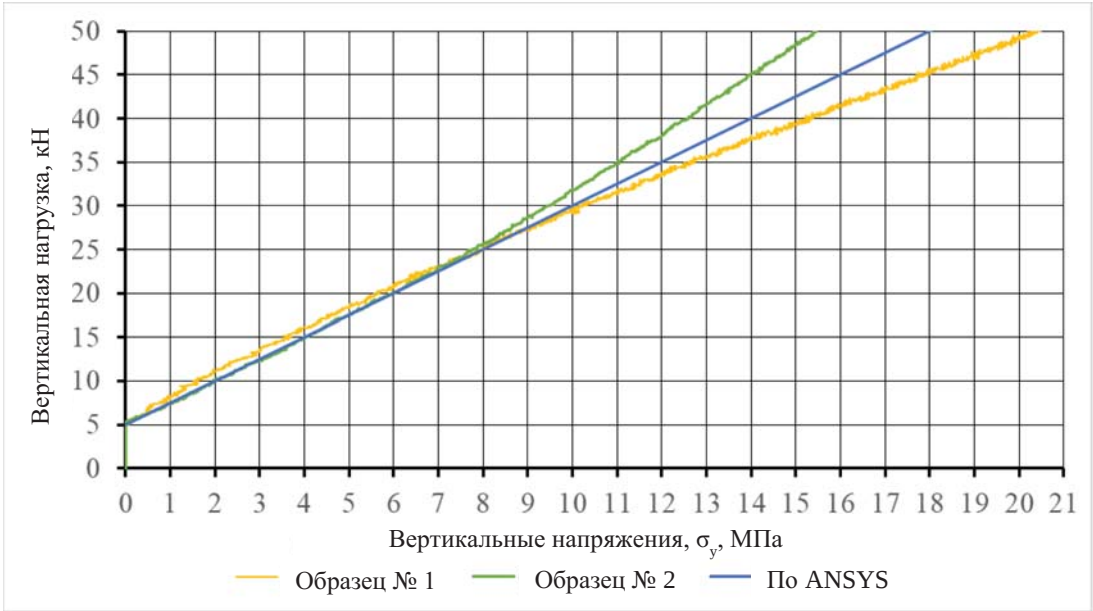


Рис. 7. Графики распределения вертикальных напряжений сжатия σ_y
Fig. 7. Plots of the vertical compression stress distribution σ_y

Заключение

Результаты исследования подтвердили эффективность применения программного комплекса ANSYS для моделирования сложных соединений анизотропных конструкционных материалов. Это подтверждается сходимостью данных, полученных в ходе натурных испытаний деревянных брусков из сосны второго сорта, и данных, полученных в ходе компьютерного моделирования.

Важно отметить, что эта сходимость была достигнута для упругой стадии работы материала, моделирование пластической стадии требует дальнейших исследований.

Моделирование соединений анизотропных конструкционных материалов с учетом их особенностей не только позволяет сократить расходы на создание и тестирование образцов, но и открывает возможности для оптимизации процесса проектирования. На этапе моделирования можно корректировать геометрию элементов, свойства материалов, режим испытания, выявлять и устранять недочеты конструкции, что в конечном итоге приводит к более эффективному использованию ресурсов.

Список литературы

1. Данилов В.М., Ерофеев А.В., Горохов Т.И. Возможности программного комплекса ANSYS для решения научно-практических задач в строительстве. В: Молодые ученые – развитию национальной технологической инициативы (Поиск 2021). Сб. материалов Национальной (с международным участием) молодежной науч.-техн. конф. Иваново: ИВГПУ; 2021, с. 182–185.
2. Мартыненко Т.М., Пронкевич С.А., Мартыненко И.М., Максимович В.А. Анализ прочности узловых соединений при различных исполнениях конструкции на основе моделирования в среде ANSYS. В: Механика исследования и инновации. Междунар. сб. науч. ст. Вып. 15. Гомель; 2022, с. 147–151.
3. Козлов Д.В., Муйземнек А.Ю., Гуськов М.С. Варианты упрощения модели расчета композиционного материала в программном комплексе ANSYS. В: Информационные технологии в науке и образовании. Проблемы и перспективы. Сб. ст. по материалам VIII Всероссийской межвузовской науч.-практ. конф. Пенза: ПГУ; 2021, с. 362–363.
4. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456082589>.
5. Шемякин Е.И., Тутурин С.В., Короткина М.Р. Разрушение древесины при сжатии. Вестник МГУЛ – Лесной Вестник. 2005;(3):56–70.
6. Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С. ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. 2-е изд. Москва: ЛЕНАНД; 2010.

References

1. Danilov V.M., Erofeev A.V., Gorokhov T.I. Possibilities of the ANSYS software complex for solving scientific and practical problems in construction. In: Young scientists - development of the national technological initiative [Search 2021]. Collection of materials of the National (with international participation) Youth Scientific and Technical Conference. Ivanovo: Ivanovo State Polytechnic University (ISPU); 2021, pp. 182–185. (In Russian).
2. Martynenko T.M., Pronkevich S.A., Martynenko I.M., Maksimovich V.A. Analysis of the strength of nodal joints in various design designs based on modeling in the ANSYS environment. In: Mechanics of research and innovation. International collection of scientific articles. Issue 15. Gomel; 2022, pp. 147–151. (In Russian).
3. Kozlov D.V., Muizemnek A.Yu., Guskov M.S. Options for simplifying the calculation model of composite material in the ANSYS software package. In: Information technologies in science and education. Problems

and prospects. Collection of articles based on the materials of the VIII All-Russian Interuniversity Scientific and Practical Conference. Penza: PSU; 2021, pp. 362–363. (In Russian).

4. SP 64.13330.2017. Timber structures. Updated version of SNiP II-25-80 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456082589> (In Russian).

5. *Shemyakin E.I., Tuturin S.V., Korotkina M.R.* Destruction of wood during compression. Vestnik MGUL – Lesnoy vestnik. 2005;(3):56–70. (In Russian).

6. *Morozov E.M., Muyzemnek A.Yu., Shadsky A.S.* ANSYS in the hands: The mechanics of destruction. 2nd ed. Moscow: LENAND; 2010. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Никита Викторович Колесников✉, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

Nikita V. Kolesnikov✉, Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: ko1esnikov.1998@list.ru

Максим Васильевич Арискин, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Maxim V. Ariskin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: m.v.ariskin@mail.ru

Даниил Олегович Мартышкин, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: historical95@mail.ru

Daniil O. Martyshkin, Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: historical95@mail.ru

Антон Викторович Меркушов, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: merkushov.av@mail.ru

Anton V. Merkushov, Postgraduate Student, Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: merkushov.av@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.072.222

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-79-85](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-79-85)

EDN: MNYGBD

ВАРИАТИВНОСТЬ ОЦЕНКИ ПРОЧНОСТИ И ЖЕСТКОСТИ ДЛЯ НЕПРОФИЛЬНЫХ БАЛОЧНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

А.В. КУЛАГИН, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» (УдГУ), Университетская ул., д. 1, г. Ижевск, 426034, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Традиционные пути повышения конструкционной прочности и жесткости балок в настоящее время практически исчерпаны, и оптимизация технологий производства и эксплуатации вероятнее всего находится на сочетании применения новых материалов и повышения их надежности как несущих элементов сложного геометрического профиля.

Несущие элементы строительных конструкций работают в условиях высоких нагрузок и, даже несмотря на их преимущественно статический характер, могут испытывать сложное объемное напряженно-деформированное состояние, что не всегда удается подтвердить эмпирическим и статистическим путями.

Цель настоящей статьи состоит в предложении одного подхода оценки прочности и жесткости балочных конструкций, работающих в условиях поперечного изгиба сложного геометрического профиля.

Материалы и методы. Для оценки прочности и жесткости непрофильных балочных конструкций используются классические энергетические приемы расчета прочности и жесткости Кастильяно, Максвелла – Мора или Верещагина (метод моментных площадей), начальных параметров, дифференциальных уравнений изогнутой оси балки.

Результаты. В ходе решения таких задач используются критерии подобия (сглаживания, согласования) Мизеса – Генки и Журкова, хорошо отражающие работу хрупкого или пластичного материала балки. И эти характеристики предлагается объединить в функции долговечности Журкова – Аррениуса.

Выводы. Приведенные в расчетах зависимости можно рекомендовать при проектировании в рамках улучшения изгибной статической и усталостной прочности, а также жесткости несущих элементов строительных конструкций.

Ключевые слова: прочность, жесткость, надежность, непрофильные статически определимые и неопределимые балочные конструкции, энергетические методы, критерии подобия

Для цитирования: Кулагин А.В. Вариативность оценки прочности и жесткости для непрофильных балочных конструкций. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):79–85. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-79-85](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-79-85)

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 19.03.2024

Поступила после рецензирования 08.04.2024

Принята к публикации 11.04.2024

VARIABILITY OF STRENGTH AND STIFFNESS ASSESSMENT FOR NON-PROFILE BEAM STRUCTURES

A.V. KULAGIN, Cand. Sci. (Engineering)

Udmurt State University (UdSU), Universitetskaya str., 1, Izhevsk, 426034, Russian Federation

Abstract

Introduction. Traditional ways to increase the structural strength and stiffness of beams are now almost exhausted, and optimization of production and operation technologies is mostly based on the use of new materials and increasing their reliability as bearing elements of a complex geometric profile. Bearing elements of building structures operate under high loads and, even despite their predominantly static nature, experience a complex volumetric stress and strain state, which can scarcely ever be confirmed empirically and statistically.

Aim. To propose an approach to assessing the strength and stiffness of beam structures operating under conditions of transverse bending of a complex geometric profile.

Materials and methods. Classical energy methods, including Castigliano, Maxwell–Mohr and Vereshchagin methods (moment area method), have been used to assess the strength and stiffness of non-profile beam structures, initial parameters, differential equations of the deflection curve.

Results. The similarity parameters (fitting criteria) of Mises–Hencky and Zhurkov reflect the behavior of a brittle or plastic beam material reasonably well. These characteristics are proposed to be combined in the Arrhenius–Zhurkov durability functions.

Conclusions. The dependencies given in the calculations can be recommended for improving the flexural static and fatigue strength, as well as the stiffness of the bearing elements of building structures.

Keywords: strength, stiffness, reliability, non-profile statistically determinate and indeterminate beam structures, energy methods, similarity parameters

For citation: Kulagin A.V. Variability of strength and stiffness assessment for non-profile beam structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):79–85. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-79-85](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-79-85)

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 19.03.2024

Revised 08.04.2024

Accepted 11.04.2024

Задача № 1

Условие задачи. Две консольно-закрепленные балки нагружены силой P . Размеры балок H , B , l . Сравнить значения максимальных прогибов и напряжений.

Решение. В прямоугольной балке наибольшие напряжения возникают в сечении у заделки (рис. 1).

$$\sigma_{\max} = \frac{M_x}{W_x} = \frac{6Pl}{BH^2}.$$

В треугольной балке (рис. 1) осевой момент сопротивления изгибу определится по формуле

$$W_{x\Delta} = \frac{B_z H^2}{6},$$

где переменная ширина сечения будет меняться по закону $B_z = B \frac{z}{l}$.

В сечении, находящемся на расстоянии z от силы P , напряжение найдется по формуле

$$\sigma_{\max\Delta} = \frac{Pz}{W_{x\Delta}} = \frac{6Pz}{B_z H^2}.$$

Максимальный прогиб балки на свободном торце определяется с помощью интеграла Мора

$$\delta_{1p} = \int_0^l \frac{M_{xp} M_{x1}}{EI_x} dz = \int_0^l \frac{(Pz)(1z)12}{EBH^3} dz = \frac{Pl^3}{3EI_x},$$

где $I_x = \frac{BH^3}{12}$ – осевой момент инерции сечения прямоугольной балки.

Максимальный прогиб треугольной балки определим с использованием тех же эпюр моментов, как и для балки прямоугольной (рис. 2)

$$\delta_{1p\Delta} = \int_0^l \frac{M_{xp} M_{x1}}{EI_x} dz = \int_0^l \frac{(Pz)(1z)12}{EBzH^3} dz = \frac{Pl^3}{2EI_x},$$

где $I_{x\Delta} = \frac{BzH^3}{12}$ – осевой момент инерции сечения треугольной балки.

Составим соотношение прогибов и напряжений:

$$\frac{\delta_{1p}}{\delta_{1p\Delta}} = \frac{\frac{Pl^3}{3EI_x}}{\frac{Pl^3}{2EI_x}} = \frac{2}{3}, \quad \frac{\sigma_{\max\Delta}}{\sigma_{\max}} = \frac{\frac{6Pz}{B_z H^2}}{\frac{6Pl}{BH^2}} = \frac{B_z}{B} = \frac{z}{l}.$$

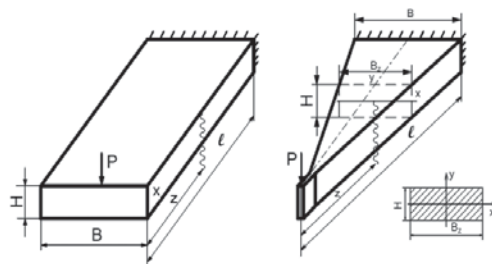


Рис. 1. Прямоугольная и треугольная балки, нагруженные силой P
Fig. 1. Rectangular and triangular beams loaded with force P

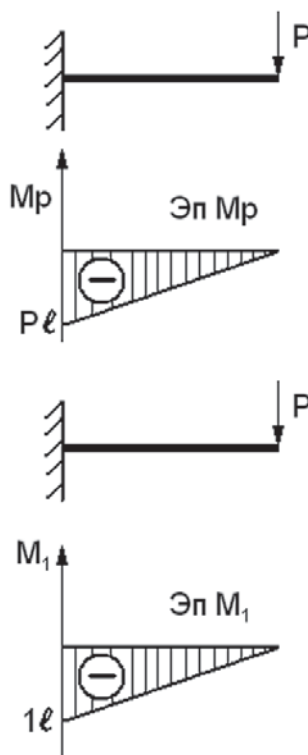


Рис. 2. Схема определения максимального прогиба с помощью интеграла Мора
Fig. 2. Scheme for determining the maximum deflection using the Mohr integral

Задача № 2

Условие задачи. Конструкция состоит из балок одинаковой жесткости $EI = const$, нагружена силой P , длиной: $AB = 3l$ и $CD = 4l$. Построить эпюры изгибающих моментов (рис. 3).

Решение. Задача статически неопределимая. Примем за неизвестное усилие X (рис. 4). Перемножим способом Верещагина эпюры изгибающих моментов для балки AB и для балки CD , получим перемещения общего для двух балок сечения B :

$$\delta_B^{(AB)} = \frac{1}{EI} \left[\frac{1}{2} 2Pl \times 2l \times \frac{7}{3}l - \frac{1}{2} X(3l)^2 \times \frac{2}{3} 3l \right] = \frac{l^3}{EI} \left(\frac{14}{3}P - 9X \right);$$

$$\delta_B^{(CD)} = \frac{2}{EI} \frac{1}{2} Xl \times 2l \times \frac{2}{3}l = \frac{4Xl^3}{3EI}.$$

$$X = \frac{14}{31}P.$$

Эпюры изгибающих моментов с найденным значением X показаны на рис. 4.

Задача № 3

Условие задачи. Брус поперечного сечения $2c \times 2c$ нагружен вертикальной силой P на свободном торце. Длина бруса l . По длине сечения бруса выполнены два отверстия с размерами $\frac{c}{2} \times \frac{c}{2}$. Определить максимальное напряжение в брусе (рис. 5).

Решение. Моменты инерции относительно главных осей x и y поперечного сечения бруса (рис. 5) определяются по формулам

$$I_x = \frac{(2c)^4}{12} - 2 \left[\frac{(c/2)^4}{12} + \frac{c^2}{4} \left(\frac{c}{\sqrt{2}} \right)^2 \right] = \frac{103}{96} c^4; \quad I_y = \frac{(2c)^4}{12} - 2 \left[\frac{(c/2)^4}{12} \right] = \frac{127}{96} c^4.$$

Изгибающие моменты в опасном сечении у заделки относительно этих осей

$$M_x = \frac{Pl\sqrt{2}}{2} = 10\sqrt{2}Pc; \quad M_y = 10\sqrt{2}Pc.$$

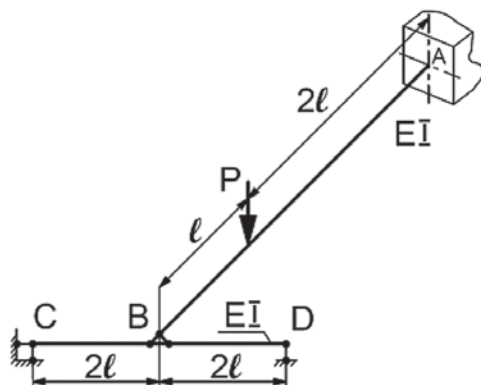


Рис. 3. Конструкция, состоящая из двух жестко соединенных балок одинаковой жесткости
Fig. 3. Structure consisting of two rigidly connected beams of equal stiffness

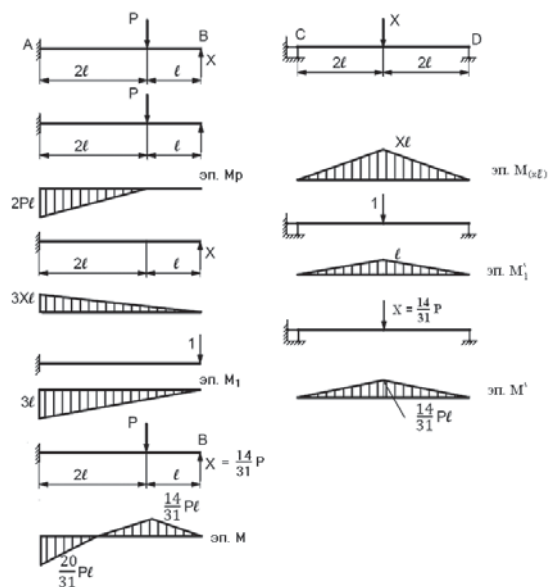


Рис. 4. Эпюры изгибающих моментов, построенные в соответствии с найденным значением X

Fig. 4. Diagrams of bending moments plotted according to the found value X

Уравнение нейтральной линии выглядит так

$$\frac{M_x}{I_x} y_o - \frac{M_y}{I_y} x_o = 0,$$

где x_o и y_o – координаты нейтральной линии сечения бруса.

Опасные точки будут в точках K_1 и K_2 от нейтральной линии (рис. 6). Напряжения σ_{K1} и σ_{K2} равны

$$\sigma_{K1} = \sigma_{K2} = \frac{M_x}{I_x} y_{K1} - \frac{M_y}{I_y} x_{K1} = \frac{10\sqrt{2}Pc \times 96c\sqrt{2}}{103c^4} = \frac{1920P}{103c^2},$$

где x_{K1} и y_{K1} расстояния наиболее удаленной точки K_1 до нейтральной линии.

Заключение. Непрофильность рассмотренных балочных систем заключается в особенности исследования геометрии и приложения нагрузок при поперечном изгибе [1–15].

Вариативность перемещений и напряжений учитывается функцией долговечности Журкова – Аррениуса в виде температурно-временной зависимости [2, 3].

$$t^B = t_B^0 \exp \frac{U_0 - \gamma \sigma_{\text{эКВ}}}{kT},$$

где параметры t^B – текущее время процесса (подстановка напряжений или перемещений вместо t^B) и t_B^0 – константа среды, не зависящая от температуры, заменяются на начальные напряжения или перемещения;

$U_0 - \gamma \sigma_{\text{эКВ}}$ – энергия активации процесса разрушения балки;

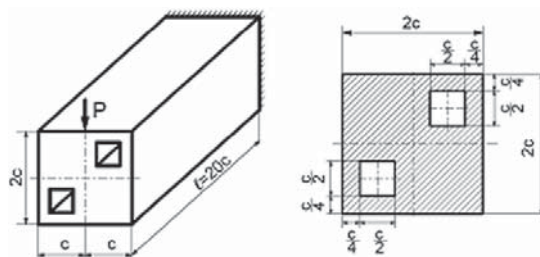


Рис. 5. Расчетная схема бруса с двумя кососимметричными квадратными отверстиями
Fig. 5. Design diagram of a beam with two antisymmetric square holes

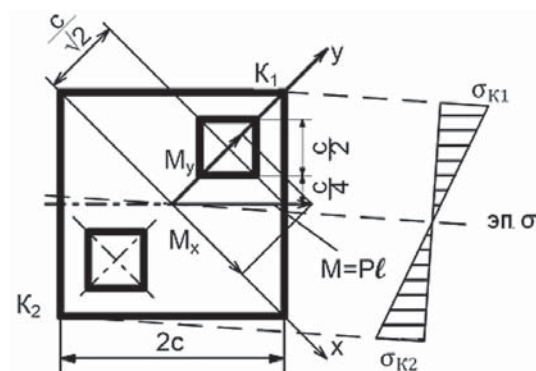


Рис. 6. Наиболее опасные точки и эпюра нормальных напряжений

Fig. 6. The most dangerous points and normal stress distribution diagram

k – постоянная Больцмана;

T – температура окружающей среды;

γ – показатель локальных повреждений балки.

Основная характеристика работы непрофильной балки по критерию Мизеса – Генки, согласно теории удельной энергии формоизменения, представляет собой эквивалентное (опасное) напряжение

$$\sigma_{\text{экв}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2},$$

где $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ – наибольшее растягивающее, среднее и наибольшее сжимающее главные напряжения.

Представленные расчеты рекомендуется использовать при проектировании колонн и стен к модульным разбивочным осям, сквозным ригелям рам, подкрановым траверсам и фермам.

Список литературы

1. Тимошенко С.П., Гере Дж. Механика материалов. Санкт Петербург: Издательство «Лань»; 2002.
2. Бабкин А.В., Селиванов В.В. Основы механики сплошных сред. Т. 1. Прикладная механика сплошных сред. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 2006.
3. Селиванов В.В. Механика разрушения деформируемого тела. Т. 2. Прикладная механика сплошных сред. Москва: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана; 1999.
4. Ананьин М.Ю. Основы архитектуры и строительных конструкций. Термины и определения. Екатеринбург: Издательство Уральского Федерального университета; 2016.
5. Зайцев Ю.В., Окольников Г.Э., Доркин В.В. Механика разрушения для строителей. Москва: ИНФРА-М; 2018.
6. Келлер И.Э., Петухов Д.С. Критерии прочности и пластичности. Пермь: Издательство Пермского национального исследовательского политехнического университета; 2020.
7. Порошин В.Б. Конструкционная прочность. Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2019.
8. Атапин В.Г. Сопротивление материалов. Москва: Издательство Юрайт; 2020.
9. Альбакасов А.И., Кудина Л.И., Гаврилов А.А. Строительная механика. Часть I. Статически определимые системы. Оренбург: Издательство Оренбургского государственного университета; 2018.
10. Холодарь Б.Г. Изгиб стержня с произвольной диаграммой деформирования материала. В: Сборник научных статей кафедры «Сопротивление материалов и теоретическая механика». Брест: Издательство Брестского политехнического института; 1994, с. 45–50.
11. Рочняк О.А., Гашко В.И. К вопросу о механизме сопротивления предварительно напряженных железобетонных балок, работающих с двузначной эпюрой изгибающих моментов, действию изгиба с поперечной силой. В: Сборник научных статей кафедры «Сопротивление материалов и теоретическая механика». Брест: Издательство Брестского политехнического института; 1994, с. 121–125.
12. Davidson D.L., Lankford J. Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics. International Materials Reviews. 1992;37(2):45–76. <https://doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.45>
13. Дородов П.В., Кулагин А.В. О запасе прочности и оценке надежности узлов металлоконструкций. Инженерный вестник Дона [интернет]. 2012;(2):420–423. Режим доступа: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/2012_2_66.pdf_810.pdf (дата доступа 01.06.2024).
14. Звездов А.И., Ведяков И.И., Соловьев Д.В. Развитие нормативных подходов по анализу риска прогрессирующего обрушения. Промышленное и гражданское строительство. 2023;(10):34–40. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.10.34-40>
15. Федорова Н.В., Савин С.Ю. Анализ особенностей сопротивления прогрессирующему обрушению конструктивных систем зданий и сооружений при внезапных структурных перестройках: аналитический обзор научных исследований. Строительство и реконструкция. 2021;(3):76–108. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108>

References

1. *Timoshenko S.P., Gere J.* Mechanics of materials: textbook for universities. St. Petersburg: Lan Publ.; 2002. (In Russian).
2. *Babkin A.V., Selivanov V.V.* Fundamentals of continuum mechanics. Vol. 1. Applied continuum mechanics. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University; 2006. (In Russian).
3. *Selivanov V.V.* Mechanics of fracture of a deformable body. Vol. 2. Applied continuum mechanics. Moscow: Publishing house of Bauman Moscow State Technical University; 1999. (In Russian).
4. *Ananyin M.Yu.* Fundamentals of architecture and building structures. Terms and definitions. Ekaterinburg: Publishing House of the Ural Federal University; 2016. (In Russian).
5. *Zaitsev Yu.V., Okolnikova G.E., Dorkin V.V.* Fracture mechanics for builders. Moscow: INFRA-M Publ.; 2018. (In Russian).
6. *Keller I.E., Petukhov D.S.* Criteria of strength and ductility. Perm: Publishing house of Perm National Research Polytechnic University; 2020. (In Russian).
7. *Poroshin V.B.* Structural strength. Chelyabinsk: Publishing center of South Ural State University; 2019. (In Russian).
8. *Atapin V.G.* Strength of materials: textbook and workshop for universities. Moscow: Yurayt Publishing House; 2020. (In Russian).
9. *Albakasov A.I., Kudina L.I., Gavrilov A.A.* Structural mechanics. Part I. Statically determinate systems. Orenburg: Orenburg State University Publishing House; 2018. (In Russian).
10. *Kholodar B.G.* Bending of a rod with an arbitrary deformation diagrammaterial. In: Collection of scientific articles of the department "Strength of Materials and Theoretical Mechanics". Brest: Publishing house of the Brest Polytechnic Institute; 1994, pp. 45–50. (In Russian).
11. *Rochnyak O.A., Gashko V.I.* On the issue of the mechanism of resistance of prestressed reinforced concrete beams, working with a two-digit diagram of bending moments, to the action of bending with transverse force. In: Collection of scientific articles of the department "Strength of Materials" and theoretical mechanics. Brest: Publishing house of the Brest Polytechnic Institute; 1994, pp. 121–125. (In Russian).
12. *Davidson D.L., Lankford J.* Fatigue crack growth in metals and alloys: mechanisms and micromechanics. International Materials Reviews. 1992;37(2):45–76. <https://doi.org/10.1179/imr.1992.37.1.45>
13. *Dorodov P.V., Kulagin A.V.* On the safety factor and reliability assessment of metal structures assemblies. Engineering journal of Don [internet]. 2012;(2):420–423. Available at: http://www.ivdon.ru/uploads/article/pdf/2012_2_66.pdf_810.pdf [access date: 01 June 2024]. (In Russian).
14. *Zvezdov A.I., Vedyakov I.I., Solovyov D.V.* Development of regulatory approaches to the risk analysis of progressive collapse. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2023;(10):34–40. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.10.34-40>
15. *Fedorova N.V., Savin S.Yu.* Progressive collapse resistance of facilities experienced to localized structural damage – an analytical review. Building and Reconstruction. 2021;(3):76–108. (In Russian). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-95-3-76-108>

Информация об авторе / Information about the author

Андрей Владимирович Кулагин, канд. техн. наук, доцент кафедры «Защита в чрезвычайных ситуациях и управление рисками», Институт гражданской защиты, ФГБОУ ВО «Удмуртский государственный университет» (УдГУ), Ижевск

e-mail: rekfuby2@rambler.ru

Andrey V. Kulagin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Protection in Emergency Situations and Risk Management, Institute of Civil Protection, Udmurt State University (UdSU), Izhevsk
e-mail: rekfuby2@rambler.ru



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



ИИИСК
ИМ. В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ. А.А. ГВОЗДЕВА



НИИОСП
ИМ. Н.М. ГЕРСЕВАНОВА

ЦОК

**центр
оценки
квалификации**

**НЕЗАВИСИМАЯ
ОЦЕНКА КВАЛИФИКАЦИИ**

*Для успешного прохождения
профессионального экзамена мы
проводим курс обучения
для подготовки к прохождению
независимой оценки квалификации
специалистов*



**Контактная информация для
консультаций и подачи заявок:
тел.: +7 (495) 174-73-80;
+7 (495) 602-00-70 (доб. 1222);
e-mail: cok-info@cstroy.ru**

УДК 699.941, 624.07, 699.81

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)

EDN: PBZONJ

ОБОСНОВАНИЕ ПРОТИВОПОЖАРНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ В ПОМЕЩЕНИИ БЛОЧНОГО ЩИТА УПРАВЛЕНИЯ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРА

Д.И. ПУЦЕВ¹, д-р техн. наук

С.Ю. МИШИНА²

Е.А. ТКАЧЕВ³

Ю.М. ГРОШЕВ^{2,✉}, канд. техн. наук

¹ ООО «Научно-технический центр «Промышленная и пожарная безопасность» (ООО «НТЦ ППБ»), ул. Свердлова, д. 65, офис 5, г. Балашиха, 143900, Российская Федерация

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

³ АО «Атомэнергoproject», ул. 2-я Советская, д. 9/2а, г. Санкт-Петербург, 191036, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В данной статье приведено обоснование мероприятий по защите систем безопасности при пожаре в помещении блочного щита управления АЭС с применением полевого метода моделирования пожара.

Цель работы: разработка мероприятий по защите систем безопасности при пожаре в помещении блочного щита управления АЭС с применением полевой модели динамики пожара.

Материалы и методы. Проведен анализ назначения и области применения различных методов моделирования динамики развития и распространения опасных факторов пожара. Рассмотрено применение полевого метода для моделирования пожара в помещениях различного назначения.

Результаты. На основании проведенного анализа различных методов моделирования динамики развития и распространения опасных факторов пожара показана возможность использования полевого моделирования пожара для анализа пожарной опасности в помещении блочного щита управления. По результатам представленных расчетов показано, что температура в месте закладки арматуры не достигает критического значения при наиболее опасном варианте развития реального пожара, относящегося к типу пожара, контролируемого вентиляцией. Даже в случае неизолированного помещения распространение опасных факторов пожара через стены невозможно в течение трех часов при любой величине пожарной нагрузки в помещении блочного щита управления.

Выводы. Показана возможность применения полевой модели динамики пожара для проведения расчетов опасных факторов пожара в различных зданиях и помещениях, в том числе для обоснования достаточности предъявляемых требований по огнестойкости строительных конструкций. Данная закономерность получена исходя из обеспечения нераспространения пожара за пределы пожарной зоны в течение расчетного времени выгорания всей пожарной нагрузки. Конкретно в рассматриваемом варианте помещения (кабельный этаж) на основании полученных результатов можно сделать вывод о том, что предусмотренная в проекте огнестойкость барьеров, разделяющих помещения системы безопасности от помещений нормальной эксплуатации, гарантирует нераспространение пожара. Полученные закономерности могут быть использованы при разработке/уточнении нормативных документов по обеспечению пожарной безопасности действующих и строящихся АЭС.

Ключевые слова: полевой метод моделирования пожара, блочный щит управления, опасные факторы пожара, комплекс программного обеспечения

Для цитирования: Пуцев Д.И., Мишина С.Ю., Ткачев Е.А., Грошев Ю.М. Обоснование противопожарных мероприятий в помещении блочного щита управления АЭС с применением полевого моделирования пожара. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):87–102. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнялось за счет средств ФГБУ ВНИИПО МЧС России, ООО «НТЦ ППБ», АО «Атом-энергопроект».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 22.03.2024

Поступила после рецензирования 18.04.2024

Принята к публикации 25.04.2024

JUSTIFICATION OF FIRE PROTECTION MEASURES IN THE NPP CONTROL ROOM USING CFD FIRE MODELING

D.I. PUTSEV¹, Dr. Sci. (Engineering)

S.Yu. MISHINA²

E.A. TKACHEV³

Yu.M. GROSHEV^{2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

¹ Scientific and Technical Centre "Industrial and Fire Safety" (NTC PPB), Sverdlova str., 65, office 5, Balashikha, 143900, Russian Federation

² JSC Atomenergoproekt, Bakuninskaya str., 7, bld. 1, Moscow, 107996, Russian Federation

³ JSC Atomenergoproekt, Vtoraya Sovetskaya str., 9/2a, St. Petersburg, 191036, Russian Federation

Abstract

Introduction. The present paper provides justification of fire safety measures to protect systems of the main control room of NPP using computational fluid dynamics fire modeling.

Aim. To develop fire protection measures for systems of the NPP control room using computational fluid dynamics model.

Materials and methods. The study involved analysis into purpose and application scope of various methods for modeling dynamics of development and spread of fire hazards. The application of the computational fluid dynamics fire modeling for multifunctional premises was considered.

Results. Following the analysis of different methods for modeling the dynamics of development and spread of fire hazards, the present paper introduces the potential of using various methods of fire modeling in the evaluation of fire hazards for main control room. The obtained computations show that the temperature at the reinforcement site remains below the critical value in the most dangerous fire development scenarios like ventilation controlled fire. Moreover, fire hazards fail to spread through the walls of an uninsulated room within three hours at any value of fire load in main control room.

Conclusions. The study revealed a potential for using computational fluid dynamics fire modeling for evaluating fire hazards in various buildings and premises, as well as for justifying the sufficiency of fire resistance requirements established for building structures. This regularity is obtained under conditions of preventing the spread of fire beyond the fire zone within the estimated burnout time of the entire fire load. The results

received for this particular type of premises (cable floor) indicate that the designed fire resistance of the barriers separating safety system premises and normal operation premises guarantees non-proliferation of fire. The obtained regularities can be used in the development/revision of regulatory documents on fire safety at operating NPPs and NPPs under construction.

Keywords: CFD fire modeling, main control room, fire hazards, software package

For citation: Putsev D.I., Mishina S.Yu., Tkachev E.A., Groshev Yu.M. Justification of fire protection measures in the NPP control room using CFD fire modeling. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):87–102. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-87-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-87-102)

Authors contribution statement

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

Funding

The study was carried out with the financial support of FGBU VNIPO EMERCOM of Russia, NTC PPB, JSC Atomenergoproekt.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 22.03.2024

Revised 18.04.2024

Accepted 25.04.2024

Введение

Целью работы является обоснование защиты систем безопасности от отказов по общей причине при пожаре в помещении блочного щита управления (БЩУ) в связи с отсутствием установок пожаротушения на блочном щите управления. На БЩУ расположены элементы оборудования и кабели, относящиеся к разным каналам систем безопасности. Канальное оборудование и кабели расположены в одной пожарной зоне, в результате одного исходного события «пожар» возможен выход из строя оборудования и кабелей разных каналов, расположенных в рассматриваемой пожарной зоне. В этом случае отказы оборудования разных каналов системы безопасности (СБ) следует рассматривать как отказ по общей причине по отношению к исходному событию. Оценка достаточности противопожарной защиты и физического разделения элементов разных каналов систем безопасности, включая элементы САЭ, выполняется на основе расчетно-аналитического анализа влияния пожара на БЩУ на безопасность АЭС.

Для проведения расчета динамики скорости развития и возможных режимов пожара, определения требований к безопасным расстояниям и пределам огнестойкости огнепреграждающих конструкций российскими нормами предусмотрено применение расчетных и экспериментальных методов. В последние годы у нас в стране и за рубежом большое внимание уделяется развитию расчетных методов оценки огнестойкости. Сущность расчета в общем виде сводится к оценке распределения температур по сечению конструкции в условиях пожара (теплотехническая часть) и вычислению несущей способности нагретой конструкции (статическая часть). Однако теория огнестойкости строительных конструкций еще недостаточно разработана, поэтому даже опытному конструктору нелегко спроектировать нужную по качеству огнезащиту силовых элементов конструкций. Первая проблема,

которую преодолевает инженер-проектировщик на этом пути, заключается в определении характера распределения температур в сечениях материала строительной конструкции через некоторые интервалы времени. Иными словами, он должен решить задачу нестационарного прогрева материала силового элемента в условиях пожара.

Методики расчета локальных параметров пожара

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

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

а) интегральный метод:

- для зданий, содержащих развитую систему помещений малого объема простой геометрической конфигурации;
- для помещений, где характерный размер очага пожара соизмерим с характерными размерами помещения и размеры помещения соизмеримы между собой (линейные размеры помещения отличаются не более чем в 5 раз);
- для предварительных расчетов с целью выявления наиболее опасного сценария пожара.

б) зонный (зональный) метод:

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

В отличие от интегральных моделей зональный метод может использоваться:

- для помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения;
- для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т. д.).

в) полевой метод:

- для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград (атриумы с системой галерей и примыкающих коридоров, многофункциональные центры со сложной системой вертикальных и горизонтальных связей и т. д.);
- для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше (меньше) остальных (тоннели, закрытые автостоянки большой площади и т. д.);
- для иных случаев, когда применимость или информативность зонных и интегральных моделей вызывает сомнение (уникальные сооружения, распространение пожара по фасаду здания, необходимость учета работы систем противопожарной защиты, способных качественно изменить картину пожара, и т. д.).

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

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

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

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

При расчетах использовались программы, официально зарегистрированные в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам (Интегральные, зонные и полевые методы расчета динамики опасных факторов пожара, № 2006614238. Определение огнестойкости строительных конструкций с учетом параметров реального пожара, № 2006614237).

Методики определения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкций на основе расчетов динамики пожара в помещении

Эмпирические методы расчета режима пожара и степени воздействия опасных факторов пожара (ОФП) на конструкции во многих случаях дают непосредственную оценку эквивалентной (по степени воздействия) продолжительности для строительных конструкций. При проведении расчетов динамики пожара в помещении на основе среднеобъемных или полевых дифференциальных уравнений возможны более точные расчеты параметров развития пожара, но непосредственных данных об эквивалентной продолжительности пожара из решения не следует. В этих случаях возможны два подхода к определению требований по огнестойкости:

1. По результатам моделирования пожара определяются его продолжительность и динамика среднеобъемных характеристик. На основе эмпирических методов определяется эквивалентная продолжительность пожара для строительных конструкций.

2. Производится решение сопряженной задачи теплообмена, то есть в процессе моделирования пожара проводится непосредственный расчет режимов прогрева строительных конструкций. По результатам максимального (среднего или локального) прогрева конструкций оценивается возможность ее повреждения в условиях реального пожара. В этом случае необходим более сложный анализ прочности в условиях прогрева, в то же время дающий более точные результаты, так как определяется фактическая огнестойкость, а не пересчет на результаты испытаний в стандартных условиях.

Исходные данные для расчетного анализа

Помещения щитов управления предназначены для размещения в них панелей и пультов контроля, управления и регулирования. В качестве щитовых изделий используются как панели, так и щиты шкафные, на которых устанавливаются вторичные приборы: табло, кнопки и ключи управления и т. д. Ограждающие конструкции БЩУ выполнены с пределом огнестойкости не менее 1,5 часа. Двери открываются наружу.

На БЩУ размещены панели и пульта со средствами отображения основных параметров и органы управления основными механизмами и арматурой. С БЩУ осуществляется постоянный оперативный контроль и управление технологическими системами, оборудованием и процессами в основных режимах работы энергоблока. На БЩУ размещаются средства контроля параметров вспомогательных технологических установок, панели автоматического регулирования, защит и блокировок.

Основной пожарной нагрузкой на БЩУ являются кабели: контрольные, управления и электропитания.

На БЩУ предусмотрены приточная и вытяжная системы вентиляции. Во всех приточных воздуховодах при входах в данные помещения и воздуховодах вытяжных вентиляционных систем в местах выходов из данных помещений при пересечении ими противопожарных преград установлены огнезадерживающие воздушные клапаны с электроприводами. На БЩУ располагаются четыре рабочих места оперативного персонала с постоянным их присутствием.

С резервного щита управления (РЩУ) обеспечивается возможность надежного перевода реактора в подкритическое расхожденное состояние и поддержание его в этом состоянии, а также приведение в действие систем безопасности и получение информации о состоянии реактора. Основную пожарную нагрузку на РЩУ несут кабели контрольные, управления и электропитания. Ограждающие конструкции помещения РЩУ выполнены с пределом огнестойкости не менее 1,5 часа. Проход кабелей в помещение РЩУ осуществляется через кабельные шахты деаэрационной этажерки, не пересекаясь с кабелями БЩУ. Помещение РЩУ оборудовано автоматической установкой газового пожаротушения. Для помещения РЩУ предусмотрены приточная и вытяжная системы вентиляции. На воздуховодах установлены огнезадерживающие воздушные клапаны с электроприводами. По сигналу автоматической установки пожарной сигнализации клапаны автоматически закрываются. Постоянно присутствующего персонала на РЩУ нет.

Системы вентиляции

В помещениях БЩУ, РЩУ, кабельного этажа БЩУ, в которые подводятся кабели от трех каналов безопасности, вентиляция осуществляется отдельными системами для каждого из данных помещений, при этом вентиляционные установки также запитываются от трех каналов. На воздуховодах устанавливаются противопожарные клапаны. Для предотвращения распространения пожара по воздуховодам вентиляционных систем предусмотрены:

- раздельная вентиляция помещений, относящихся к разным каналам безопасности;
- установка огнезадерживающих клапанов в местах пересечения воздуховодами противопожарных перегородок и перекрытий.

Отдельные системы приточно-вытяжной вентиляции предусмотрены для кабельных этажей нормальной эксплуатации, кабельных этажей каналов безопасности.

Оборудование этих вентиляционных систем установлено в отдельных помещениях, на воздуховодах при пересечении ими противопожарных преград устанавливаются огнезадерживающие клапаны.

Вентиляционные системы, обеспечивающие подпор в лестничные клетки, автоматически включаются от извещателей пожарной сигнализации и дублируются ручным включением – от кнопок у входа на лестничную клетку, а также с пожарной панели, находящейся

в БЩУ. Огнезадерживающие клапаны закрываются автоматически от пожарных извещателей, а также от дублирующего термомеханического привода – легкоплавкой вставки, а также дистанционно с пожарной панели БЩУ.

Дублирование выполнения функций безопасности на РЩУ

В инструкциях и оперативных карточках определен порядок действий оперативного персонала при осуществлении управления энергоблоком с РЩУ. В соответствии с приведенными документами определена возможность осуществления основных функций безопасности непосредственно с РЩУ.

Постановка задачи расчетного моделирования и определение сценариев протекания и распространения пожара

При возникновении пожара на БЩУ возможно его тушение первичными средствами пожаротушения оперативным персоналом и прибывающими по вызову пожарными подразделениями.

В то же время, поскольку в помещении отсутствуют обеспечивающие безопасность стационарные установки пожаротушения, тушение пожара не гарантировано. В дальнейшем рассматриваются сценарии, возникающие при неудачном осуществлении операций по тушению, приводящие к развитию пожара на БЩУ. В связи со значительными пожарными нагрузками БЩУ при развитии и распространении пожара возможен его переход из начальной в объемную стадию и потеря всего незащищенного (от воздействия ОФП) оборудования, в том числе оборудования СБ. Расчет максимально возможной скорости развития пожара, временные параметры критического воздействия ОФП на оборудование и оперативный персонал являются основной целью математического моделирования пожара. Вторым этапом анализа пожара является оценка возможности осуществления процедуры безопасного останова и расхолаживания реакторной установки (РУ) в условиях воздействия ОФП при развитии пожара.

Критическим, с точки зрения нарушения процедуры безопасного останова и расхолаживания, предполагается непосредственное развитие пожара в оперативной части БЩУ и работа персонала в условиях воздействия ОФП.

Наиболее консервативным вариантом развития пожара считается начало пламенного горения у одного из пультов управления РУ в результате множественных коротких замыканий. Для определенности выбран вариант пламенного горения пульта № 31. Данный пульт имеет наибольшие размеры (1300 × 1000 мм) и расположен близко к центральной части помещения. Предполагается локализация пожара в пределах одного пульта и отсутствие распространения пожара на соседние пульты до начала критического воздействия ОФП на оперативный персонал. Корректность данного предположения будет оценена по результатам расчетного моделирования динамики пожара.

Определение последовательности действий персонала при переходе на РЦУ

В соответствии с технологическим регламентом эксплуатации энергоблока «Административный» при работе на мощности должен проводиться холодный останов в случае возникновения пожара в помещениях БЩУ, РЩУ. Для ряда аварийных ситуаций, в том числе при пожаре на БЩУ, разработана аварийная процедура.

Таким образом, последовательность действий персонала при пожаре на БЩУ может быть рассмотрена на основе ее положений вне зависимости от режима работы энергоблока. Функции безопасности могут быть выполнены в полном объеме при управлении энергоблоком с РЩУ. Основные функции выполняются персоналом непосредственно на РЩУ, часть функций по контролю состояния РУ выполняется дистанционно, с помощью выделенной телефонной линии. Следовательно, безопасность энергоблока определяется возможностью реализации разработанной процедуры передачи управления на РЩУ в условиях пожара.

Результаты расчетного моделирования

Представление полей ОФП

Динамика полей ОФП представляется в общем объеме БЩУ. Пример аксонометрической проекции с указанием элементов оборудования и конструкций приведен на рис. 1.

Место начала пожара, пульт № 31, выделено на графике (рис. 2).

Результаты расчетов динамики пожара

Результаты расчетов динамики пожара представлены на рис. 3–14.

Поля абсолютной температуры представлены в аксонометрических проекциях. Поля массовой концентрации продуктов горения – в горизонтальной угловой проекции, сечения перпендикулярны продольной оси машинного зала, оси X на графиках (рис. 3–14).

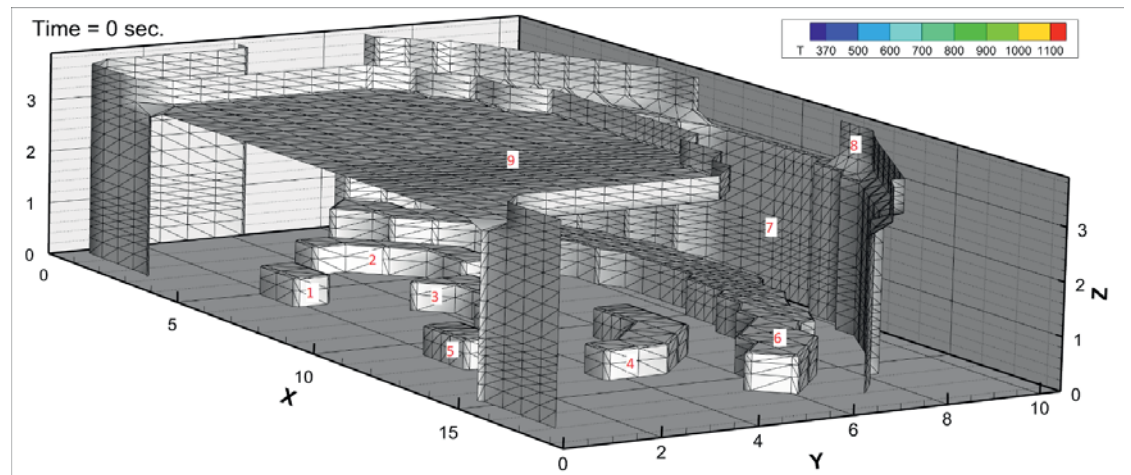


Рис. 1. Общий вид БЩУ. Аксонометрия со стороны машзала. Элементы оборудования и конструкций
Fig. 1. MCC: general view. Axonometric view from the turbine hall. Elements of equipment and structures

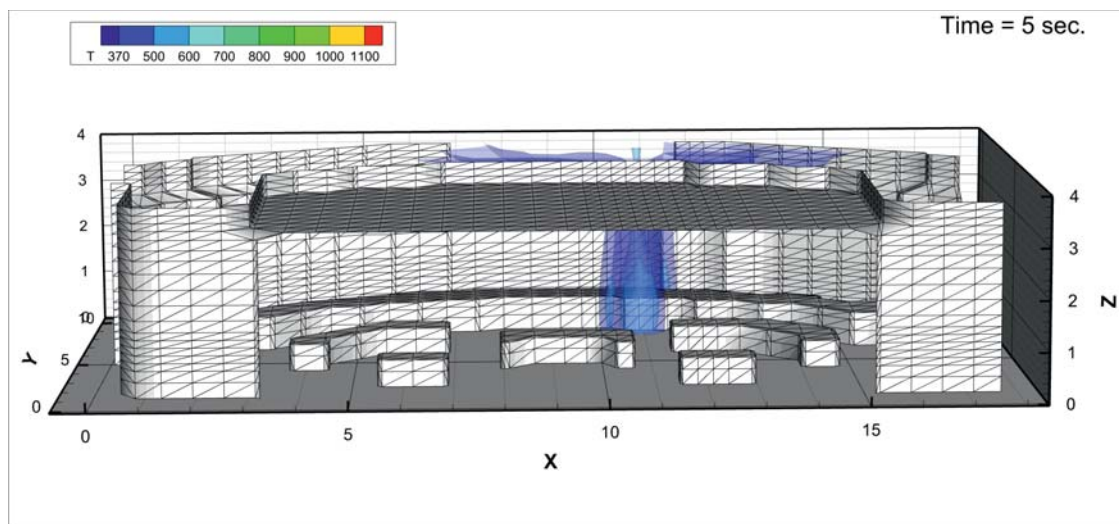


Рис. 2. Общий вид БЩУ. Аксонометрия со стороны машзала. Место начала пожара
Fig. 2. MCR: general view. Axonometric view from the turbine hall. Fire-outbreak site

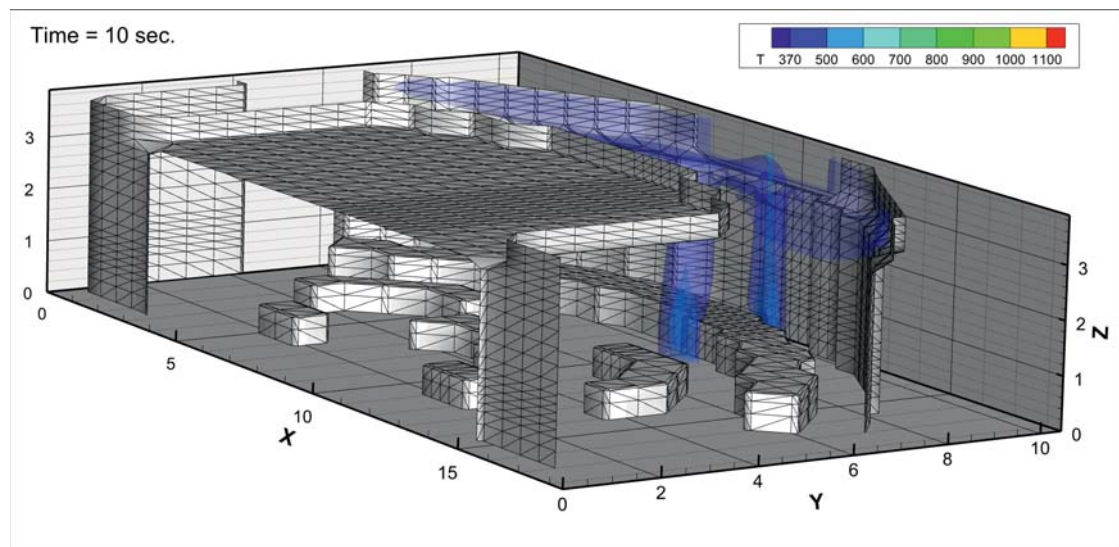


Рис. 3. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 К
Fig. 3. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

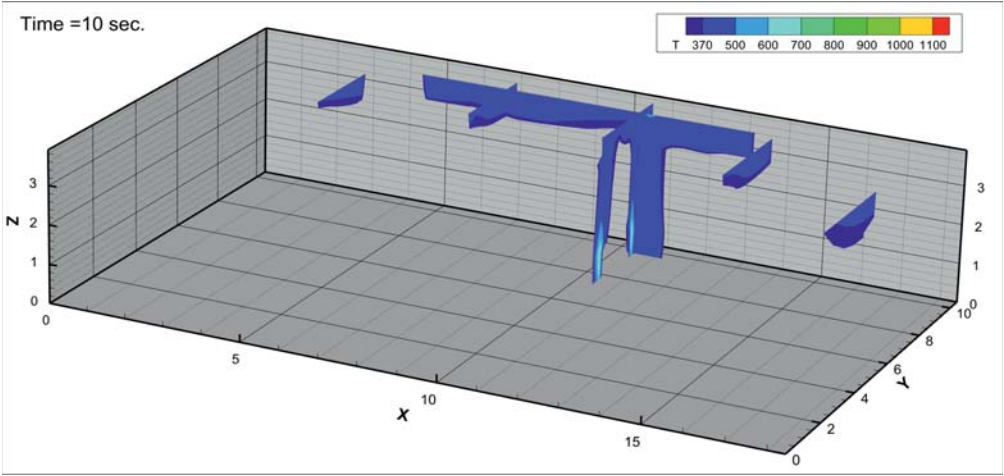


Рис. 4. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 4. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

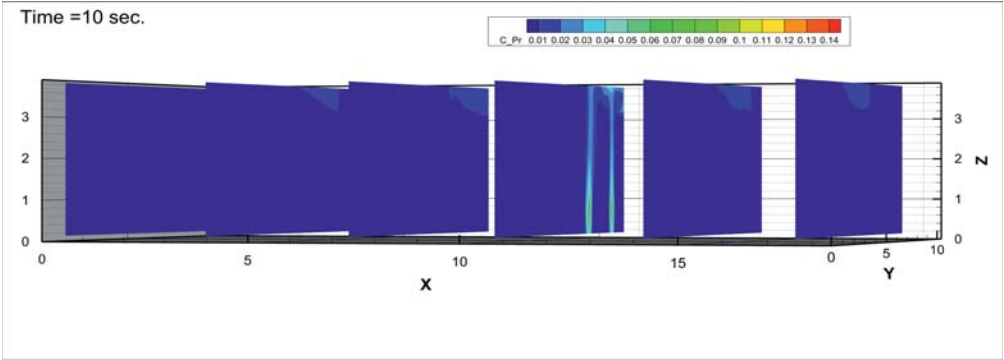


Рис. 5. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 5. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

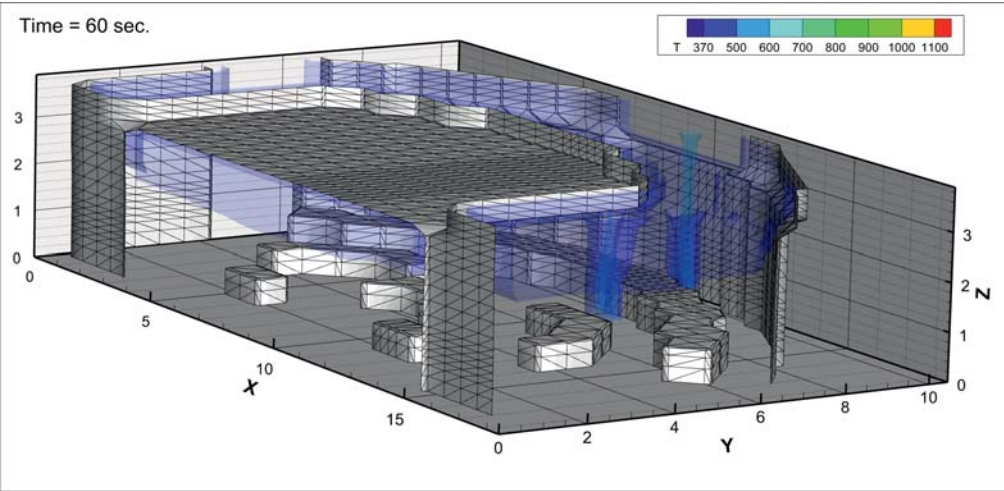


Рис. 6. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 К
Fig. 6. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

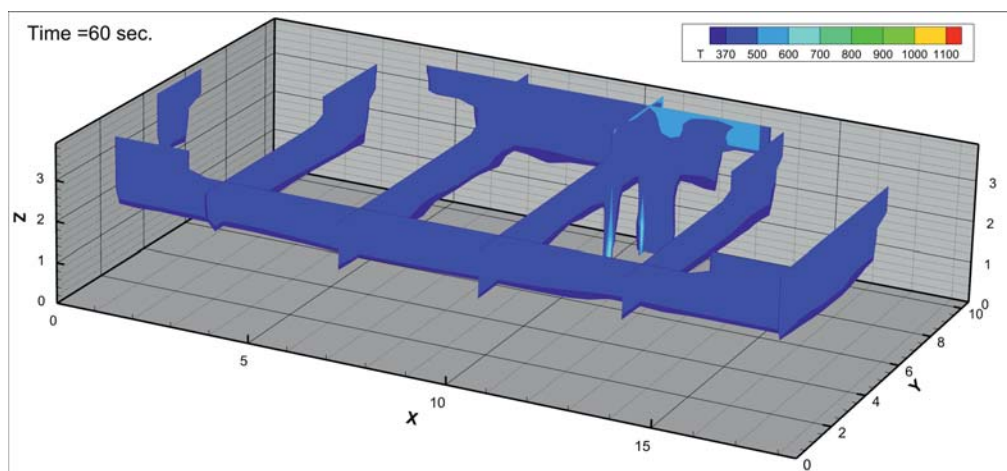


Рис. 7. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 7. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

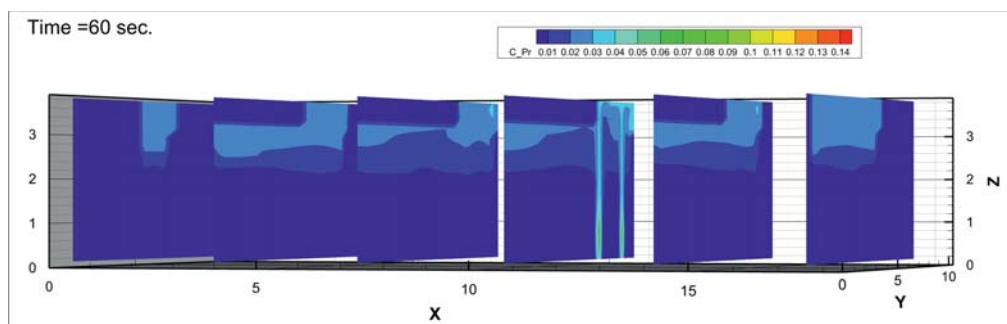


Рис. 8. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 8. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

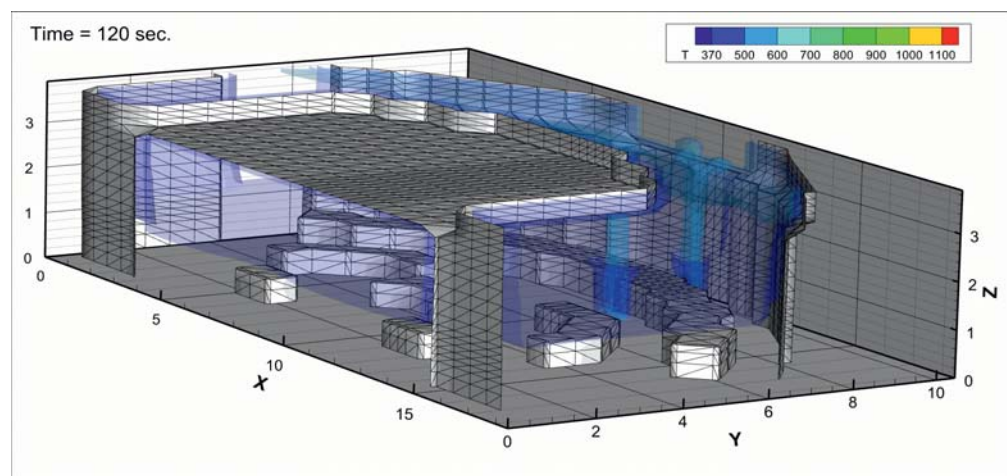


Рис. 9. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 К
Fig. 9. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

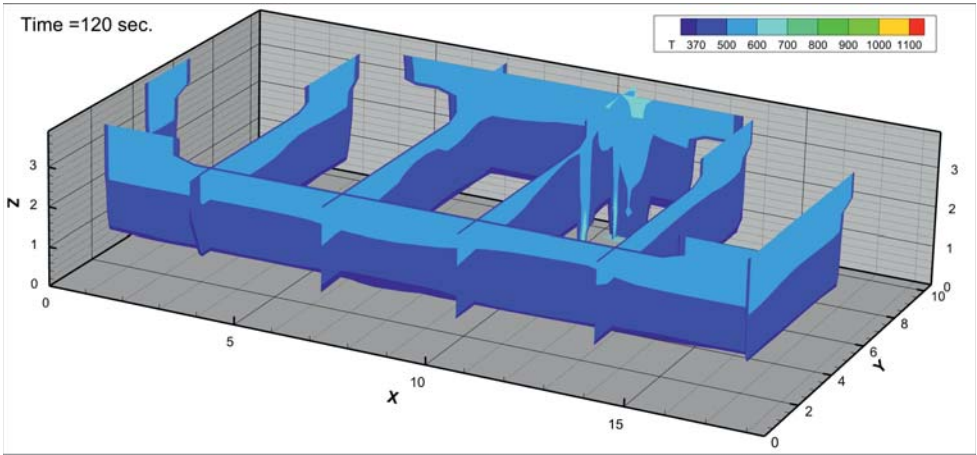


Рис. 10. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 10. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

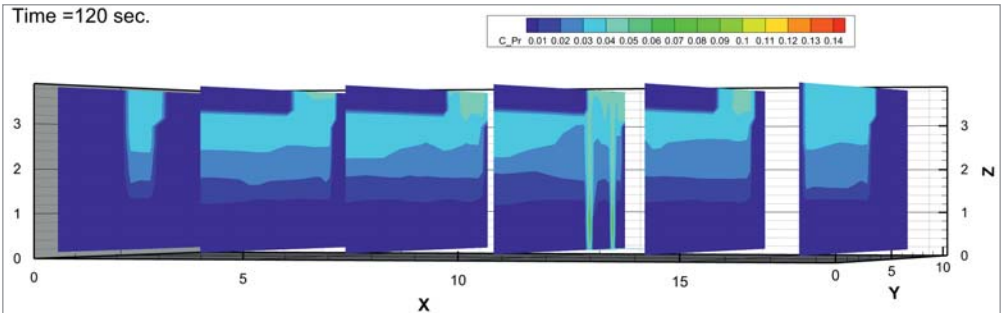


Рис. 11. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 11. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

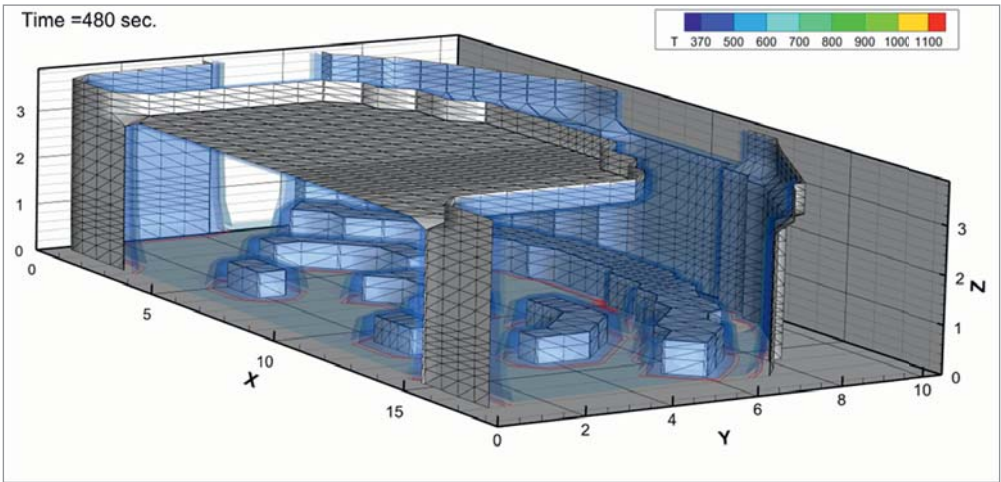


Рис. 12. Поля абсолютной температуры, К. 3D-поверхности 370 и 550 K
Fig. 12. Absolute temperature fields, K. 370 and 550 K: 3D surfaces

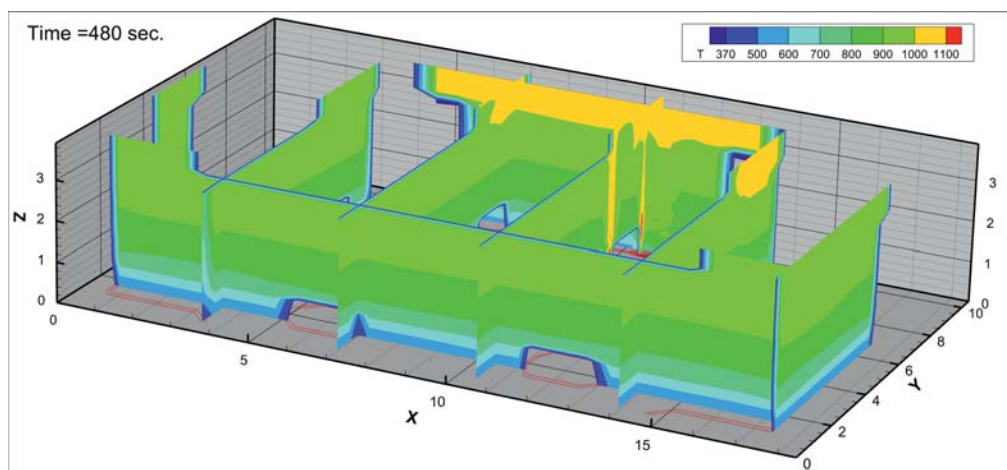


Рис. 13. Поля абсолютной температуры, К. Продольные и поперечные сечения
Fig. 13. Absolute temperature fields, K. Longitudinal and cross sections

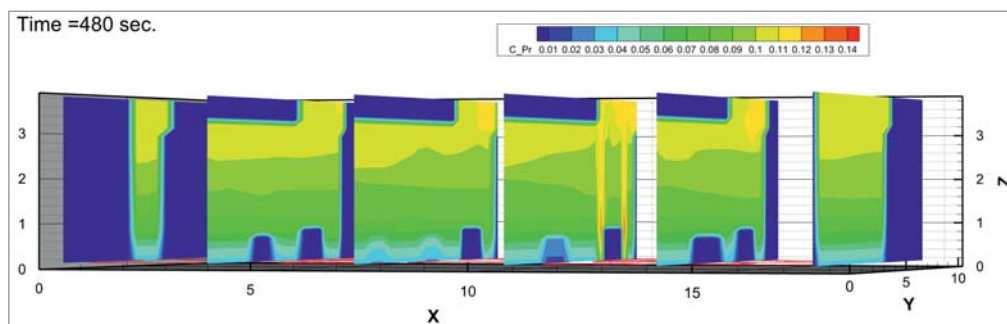


Рис. 14. Поля концентрации продуктов горения. Горизонтальная проекция
Fig. 14. Fields of combustion product concentration. Horizontal view

Расчет времени перехода из БЩУ в РЩУ

Два независимых варианта перехода оперативного персонала из БЩУ в РЩУ определены на плане эвакуации. Максимальная длина пути эвакуации, вариант № 2, составляет 87 м. Время перехода может быть оценено на основе скорости движения людей при эвакуации. Плотность потока менее минимальной, скорость движения – 100 м/мин. Время перехода на РЩУ – не более 53 секунд. Реализация персоналом процедуры перевода управления на РЩУ и ее составных частей с учетом имеющегося времени до потери БЩУ может быть оценена следующим образом:

- Задействование автомата защиты в течение первой минуты с начала пламенного горения – высокая вероятность, поскольку останов является стандартной процедурой, предусмотренной техническим регламентом по эксплуатации РУ.
- Принятие решения по переходу на РЩУ в течение 90 секунд с начала пламенного горения – высокая вероятность с учетом регламентированности процедуры и наблюдаемого интенсивного развития пожара.
- Переход части персонала на РЩУ в течение 53 секунд. Контроль РУ оставшимся на БЩУ персоналом до наступления критического воздействия ОФП.

– Начало действий по контролю РУ на 143-й секунде, покидание персоналом БЩУ до начала потери управления на блочном щите. Общий вывод по результатам расчетного анализа динамики развития пожара на БЩУ и оценки возможности реализации функций безопасности энергоблока на РЩУ: с учетом консервативного рассмотрения аварийной ситуации, связанной с пожаром на БЩУ, определена возможность безопасной реализации функций управления и контроля РУ в рамках предусмотренной на энергоблоке № 1 процедуры передачи управления на РЩУ.

Заключение

1. Созданная и апробированная полевая модель динамики пожара предназначена для проведения расчетов с учетом специфики пожарной опасности и технологических особенностей атомной станции. Полевая модель динамики пожара оптимизирована с учетом специфики АЭС, осуществлена ее реализация в рамках комплекса программного обеспечения Fire Dynamics.

2. Применение предложенной полевой модели позволяет обосновать достаточность принятых пределов огнестойкости строительных конструкций зданий и помещений исходя из обеспечения нераспространения пожара за пределы пожарной зоны в течение расчетного времени свободного выгорания всей пожарной нагрузки.

3. Описан методический подход к определению требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкции помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара. Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов, поэтому он широко может использоваться для определения/уточнения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкции помещений АЭС.

На основе анализа документации по обеспечению безопасности энергоблока № 1 Калининской АЭС при пожаре на БЩУ и расчетно-аналитического исследования протекания пожаров можно сделать следующие основные выводы:

1. Значительные пожарные нагрузки, отсутствие стационарных систем пожаротушения на БЩУ определяют пожарную опасность данного помещения. Применение ручных средств пожаротушения не гарантирует тушения пожара при его интенсивном развитии. При интенсивном развитии пожара полное задымление помещения может наступить менее чем через 300 секунд после начала пламенного горения. В этом случае эффективные действия пожарных подразделений по тушению пожара на начальной стадии маловероятны из-за сравнимого и большего времени следования к месту тушения, разведки и развертывания. Примерно через 480 секунд после начала пламенного горения одного пульта практически во всем объеме помещения достигается избыточная температура на уровне 2500 °С.

2. С учетом автоматического отключения вентиляции по сигналу АПТ ожидаемое развитие пожара на начальной стадии в объеме помещения происходит в режиме возникновения и опускания приточного слоя продуктов горения. При рассмотренном консервативном сценарии развития пожара время подъема избыточной температуры до 700 °С и время потери видимости из-за роста концентрации продуктов горения практически совпадают и составляют 90 секунд – на уровне верха дверных проемов с выходами на пути эвакуации; 120 секунд – на уровне головы стоящего человека; 150 секунд – на уровне расположения компьютерных экранов на столах АРМ оперативного персонала. Поскольку персонал оснащен индивидуальными средствами защиты, лимитирующим фактором выполнения функций безопасности на БПУ может считаться потеря видимости.

Список литературы

1. Пуцев Д.И., Кривцов Ю.В., Грошев Ю.М., Лобанова Н.А. Оценка возможности применения полевого моделирования пожара для проведения расчетов пожаров в зданиях и помещениях. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;37(2):37–70. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-37-70](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-37-70)
2. Пуцев Д.И., Мишина С.Ю., Грошев Ю.М. Обоснование мероприятий по обеспечению необходимых пределов огнестойкости ограждающих конструкций помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара. Вестник НИЦ «Строительство». 2024;40(1):49–60. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-49-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-49-60)
3. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации [интернет]. Москва: ВНИИПО; 2003. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808018.pdf>.
4. Карпов А.В., Рыжов А.М. Рекомендации по применению полевого метода математического моделирования пожара. Москва: ВНИИПО; 2002.
5. Рекомендации по оценке пожароустойчивости систем (элементов), важных для безопасности, на Российских АЭС. Москва: ВНИИАЭС; 2000.
6. Молчадский И.С., Астахова И.Ф. Математическая модель температурных полей начальной стадии пожара в помещении. Пожаровзрывобезопасность. 1995;4(2):31–33.
7. Верификация трехмерной математической модели расчета динамики пожара для оценки воздействия пожара на оборудование АЭС. Москва: ООО «СТЭМ»; 2001.
8. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Москва: Стандартинформ; 2014.
9. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Андреев В.В., Козлов Ю.И. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Москва: Академия ГПС МЧС России; 2012.
10. РД 03-34-2000. Требования к составу и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии [интернет]. Режим доступа: <https://www.secncs.ru/upload/files/rd2000.pdf>.
11. НП-001-15. Федеральные нормы и правила в области использования атомной энергии. Общие положения обеспечения безопасности атомных станций. Москва: ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности»; 2016.
12. СП 13.13130.2009. Атомные станции. Требования пожарной безопасности. Москва: МЧС России; 2009.
13. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность. Общие требования. Москва: Стандартинформ; 2006.

References

1. Putsev D.I., Krivtsov Yu.V., Groshev Yu.M., Lobanova N.A. Evaluating feasibility of field modeling of fire to calculate fire characteristics in buildings and premises. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2023;37(2):37–70. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-37-70](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-37-70)
2. Putsev D.I., Mishina S.Yu., Groshev Yu.M. Justification of measures aimed at ensuring the required fire resistance of structures enclosing NPP premises using CFD fire modeling. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2024;40(1):49–60. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-49-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-49-60)
3. Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires: Methodological recommendations [internet]. Moscow: VNIPO; 2003. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808018.pdf> (In Russian).
4. Karpov A.V., Ryzhov A.M. Recommendations for the use of the field method of mathematical modeling of fire. Moscow: VNIPO; 2002. (In Russian).
5. Recommendations for assessing the fire resistance of systems (elements) important for safety at Russian nuclear power plants. Moscow: VNIIAES; 2000. (In Russian).
6. Molchadsky I.S., Astakhova I.F. Mathematical model of temperature fields of the initial stage of a fire in a room. Fire and Explosion Safety. 1995;4(2):31–33. (In Russian).
7. Verification of a three-dimensional mathematical model for calculating fire dynamics to assess the impact of fire on NPP equipment. Moscow: LLC "STEM"; 2001. (In Russian).

8. State Standard R 12.3.047-2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
9. Koshmarov Yu.A., Puzach S.V., Andreev V.V., Kozlov Yu.I. Forecasting of fire hazards in the room. Moscow: Academy of GPS of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2012. (In Russian).
10. RD 03-34-2000. Requirements for the composition and content of the report on verification and justification of software tools used to justify the safety of nuclear energy facilities [internet]. Available at: <https://www.secnrs.ru/upload/files/rd2000.pdf>. (In Russian).
11. NP-001-15. Federal norms and rules in the field of nuclear energy use. General provisions for ensuring the safety of nuclear power plants. Moscow: Federal State Budgetary Institution "Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety"; 2016. (In Russian).
12. SP 13.13130.2009. Nuclear Power Plants. Fire Safety Requirements. Moscow: Ministry of Emergency Situations of Russia; 2009. (In Russian).
13. State Standard 12.1.004-91. Occupational safety standards system. Fire safety. General requirements. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

Светлана Юрьевна Мишина, начальник отдела, АО «Атомэнергoproject», Москва
e-mail: Michina_SY@aep.ru

Svetlana Yu. Mishina, Department Head, JSC Atomenergoproekt, Moscow
e-mail: Michina_SY@aep.ru

Евгений Алексеевич Ткачев, ведущий инженер-проектировщик, АО «Атомэнергoproject», Санкт-Петербург
e-mail: EATkachev@atomproekt.com

Evgeny A. Tkachev, Leading Design Engineer, JSC Atomenergoproekt, St. Petersburg
e-mail: EATkachev@atomproekt.com

Юрий Михайлович Грошев✉, канд. техн. наук, главный специалист, АО «Атомэнергoproject», Москва
e-mail: Groshev_YM@aep.ru

Yuri M. Groshev✉, Cand. Sci. (Engineering), Chief Specialist, JSC Atomenergoproekt, Moscow
e-mail: Groshev_YM@aep.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.131.53

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-103-117](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-103-117)

EDN: TENFGK

ОСОБЕННОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МОДЕЛИ ГИБКОЙ ПОДПОРНОЙ СТЕНКИ И ГРУНТА ЗАСЫПКИ. ЭКСПЕРИМЕНТ В ЛАБОРАТОРНЫХ УСЛОВИЯХ

В.В. БРЫКСИН

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

Аннотация

Введение. В отечественных нормах боковое давление грунта регламентируется определять для стадии, соответствующей образованию поверхности скольжения, что отвечает теории Кулона. При этом предельные величины давления грунта на гибкую стенку не зависят от характера и интенсивности деформаций подпорной конструкции. В связи с этим возникает необходимость совершенствования методов расчета ограждений для учета вышеуказанных факторов.

Цель работы: получение опытных данных для разработки метода расчета активного давления грунта на подпорные конструкции в зависимости от их деформаций.

Материалы и методы. Опытные работы выполнены методом физического моделирования для различных схем моделей гибких подпорных стенок с использованием специализированного лабораторного испытательного стенда. В качестве модельного грунта засыпки применялся песок средней крупности, определение физических характеристик которого производилось в лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 5180-2015.

Результаты. Проведенные исследования позволили получить данные о характере деформаций грунта засыпки в пределах призмы обрушения для различных кинематических условий работы модели подпорной стенки и, соответственно, обосновать применение феноменологической модели наклонных блоков, использованной для разработки метода определения активного давления грунта на ограждающие конструкции.

Выводы. Опытные исследования показали соответствие характера деформирования грунта засыпки и принятых условий работы грунта в рамках разработки инженерного метода определения бокового давления грунта. Полученные экспериментальные данные могут быть использованы в процессе реализации и верификации предлагаемого метода расчета, который позволит проектировать ограждения котлованов более обосновано и во взаимном соответствии с фактическими эпюрами давления грунта.

Ключевые слова: активное давление грунта, гибкие подпорные стенки, экспериментальный анализ, численное моделирование

Для цитирования: Брыксин В.В. Особенности деформирования модели гибкой подпорной стенки и грунта засыпки. Эксперимент в лабораторных условиях. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):103–117. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-103-117](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-103-117)

Вклад автора

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

Финансирование

Статья написана в рамках выполнения НИОКР за счет финансирования ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.03.2024
Поступила после рецензирования 18.04.2024
Принята к публикации 25.04.2024

EXPERIMENTAL RESEARCH OF A FLEXIBLE RETAINING WALL MODEL IN LABORATORY CONDITIONS

V.V. BRYKSIN

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. The Russian standards determine the lateral earth pressure at the failure surface stage, which corresponds to the Coulomb's theory. In this case, the limit values of earth pressure on the flexible wall remain independent from the nature and intensity of deformation of the retaining structure. Therefore, computational methods for retaining walls are to be improved considering the above-mentioned factors.

Aim. To obtain experimental data in order to develop a computational method for determination of the active earth pressure on retaining structures depending on their deformations.

Materials and methods. Experimental tests were carried out by physical simulation for various models of flexible retaining walls using a purpose-designed laboratory test bench. Medium sand was used as a model backfill soil; its physical properties were determined under laboratory conditions in accordance with State Standard 5180-2015.

Results. The tests provided data on the character of backfill soil deformations within the wedge of failure for different kinematic conditions of the retaining wall model and, accordingly, justified the application of inclined block phenomenological model, used to develop a computational method for determining the active earth pressure on retaining walls.

Conclusions. Experimental tests indicate the correlation between deformation nature of the backfill soil and accepted conditions of soil operation during the development of engineering method for determining the lateral earth pressure. The obtained experimental data can be used in adoption and verification of the suggested computational method that enables shoring of excavations to be designed more reasonably in mutual conformity with the actual earth pressure diagrams.

Keywords: active earth pressure, flexible retaining walls, experimental analysis, numerical simulation

For citation: Bryksin V.V. Experimental research of a flexible retaining wall model in laboratory conditions. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):103–117. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-103-117](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-103-117)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all the aspects of the article.

Funding

The article was written as part of the implementation of R&D at the expense of funding from the Federal Center for Regulation, Standardization and Technical Assessment in Construction (FAU "FCC").

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 18.03.2024
Revised 18.04.2024
Accepted 25.04.2024

Введение

В настоящее время специальных модельных или натурных опытных исследований по изучению закономерностей поведения подпорных конструкций проводится относительно немного [1–5]. Вместе с тем отличаются широким охватом исследования, выполняемые численно при помощи математического моделирования, ввиду относительной доступности передовых программных средств по решению самых сложных геотехнических задач, в том числе и по определению бокового давления грунта на подпорные конструкции, что нашло свое отражение в подавляющем количестве публикаций [6–9].

В то же время следует отметить, что работа в современных геотехнических программных комплексах, исходя из многообразия и сложностей современных моделей грунта, связана с тщательным учетом различных факторов работы конструкций и основания, что требует от исследователя высокой квалификации, глубокого понимания внутривычислительных алгоритмов, научного подхода и способности оценивать адекватность полученных результатов численных решений с их обязательной верификацией в процессе изучения объекта исследования.

Сегодня наряду с применением современных методов численного моделирования диктуется необходимость разработки сравнительно простых и удобных для практического применения инженерных методов расчета, в основе которых лежат аналитические решения без радикальных упрощений, с обоснованными предпосылками, отражающими реальную работу основания и хорошо согласующимися с опытными данными, включая результаты экспериментальных исследований, проводимых путем физического моделирования.

В рамках работы [10] предложен инженерный численный метод для определения бокового давления грунта на гибкие подпорные конструкции в зависимости от их деформаций, построенный на основе феноменологической модели сползающих наклонных блоков (рис. 1). Метод базируется на аналитическом решении и предполагает учет особенностей

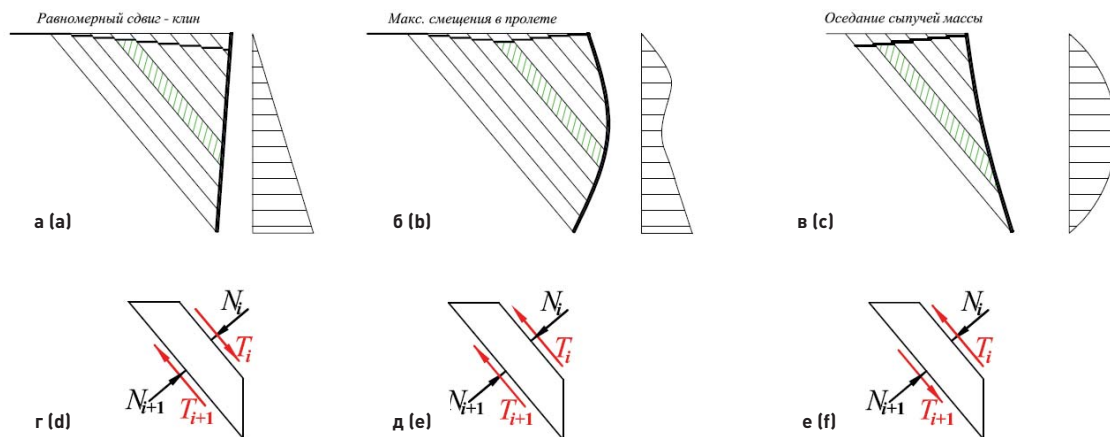


Рис. 1. Эпюры боковых давлений в зависимости от разных по характеру деформаций подпорной стенки: а – консольная схема с поворотом вокруг нижнего ребра; б – заанкеренная стенка; в – консольная схема с поворотом вокруг верхнего ребра; г, д, е – направления равнодействующих нормальных и касательных напряжений при смещении произвольной полоски грунта соответственно для случаев а, б, в

Fig. 1. Lateral pressure diagrams depending on different deformations of the retaining wall: а – cantilever model with rotation around the lower wedge; б – anchored wall; в – cantilever model with rotation around the upper edge; д, е, f – normal and shear stress resultants at displacement of an arbitrary strip of soil for а, б, с, respectively

распределения давлений в пределах призмы обрушения и действия сил трения на границах условно выделяемых наклонных блоков скольжения.

В настоящей статье приводятся результаты мелкомасштабных экспериментальных исследований модели гибкой подпорной стенки, проведенных автором в лабораторных условиях в 2021 г., направленных главным образом на верификацию предложенного ранее расчетного метода определения бокового давления грунта на гибкие подпорные конструкции [10].

Задачи и постановка эксперимента

В рамках экспериментальной части работ по исследованию распределения бокового давления грунта на гибкие подпорные стенки ставились следующие задачи:

1. Исследовать механизм деформации грунта в пределах призмы обрушения для различных кинематических условий подпорной стенки.
2. Установить соответствие применения феноменологической модели (рис. 1), использованной для разработки метода расчета ограждающих конструкций котлованов, предложенного в опубликованной ранее работе [10].
3. Качественно определить закономерность распределения активного давления, несвязанного по высоте стенки, в зависимости от величин и характера деформаций.
4. Сопоставление полученных в лабораторных условиях величин горизонтальных перемещений гибкой подпорной конструкции с данными численных расчетов.

Экспериментальные исследования для гибкой подпорной стенки выполнялись методом физического моделирования с использованием специализированного лабораторного испытательного стенда производства отечественной организации НПП «Геотек» (г. Пенза), позволяющего проводить испытания в условиях реализации плоского напряженно-деформированного состояния грунтового массива.

Объектом исследования в рамках экспериментальных работ является деформирование гибкой подпорной стенки.

Конструктивно лабораторный стенд выполнен в виде лотка с внутренними размерами: длина – 722 мм, ширина – 156 мм, высота – 536 мм, снабженного прозрачными передними и задними стенками, что дает возможность выполнять фотофиксацию поведения модели на любом этапе испытаний и выполнять интерпретации опытных результатов как методами цифровой обработки образов, так и на основе принципов фотограмметрии. Стенки выполнены из двойного стекла толщиной 12 мм. Для исключения прогибов стеклянных стенок применяются рамки жесткости в виде стальных решеток, в узлах которых расположены опорные шайбы. При помощи пневматического нагружателя имеется возможность приложения внешней нагрузки.

Общий вид лабораторного стенда в процессе проведения экспериментальных опытов представлен на рис. 2.

Опытные работы проводились в соответствии с предварительно разработанной программой экспериментальных исследований. Выбор принципиальных схем физических моделей, принятых для экспериментальных исследований, обусловлен их соответствием характерным случаям деформирования гибких подпорных конструкций и феноменологическим моделям (рис. 1).



Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда и оборудования
Fig. 2. General view of the test bench and laboratory equipment

Схема с закреплением распорками в верхней и нижней частях подпорной стенки включает в себя частный случай деформации, представленной на рис. 1, в феноменологической модели. Разработка нового инженерного метода предполагает учитывать снижения бокового давления несвязанного грунта. Подразумевается, что за счет взаимодействия посредством трения между элементарными наклонными блоками происходит неравномерное их перемещение, вследствие чего наблюдается явление снижения давления в пролетной части. Рассматриваемая схема с закреплением распорками в верхней и нижней частях подпорной стенки обеспечивает максимальную величину свободного пролета гибкой стенки в пределах лабораторного стенда и соответственно является экстремальной и необходимой для теоретических исследований и последующей разработки метода расчета подпорных конструкций в рамках настоящей работы.

Первая серия опытов проводилась для трех различных моделей:

- для подпорной стенки, работающей по консольной схеме;
- для подпорной стенки, закрепленной в верхней части распоркой;
- для подпорной стенки, закрепленной в верхней и нижней частях распоркой.

Вторая серия опытов проводилась для моделей по тем же схемам, но с приложением дополнительной пригрузки на поверхности засыпки.

Третья серия опытов состояла из специальных испытаний, направленных на определение характера деформаций грунта в пределах призмы обрушения для различных моделей,

соответствующих моделям первой серии. Данная серия исследований предполагает предварительное размещение в моделируемый массив грунта разметочных линий, отсыпаемых из окрашенного песка.

В качестве модельного грунта засыпки для первой и второй серий опытов применялся песок средней крупности в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [11], рыхлый (строка № 1, табл. 1), для третьей серии – песок средней крупности в соответствии с ГОСТ 25100-2020 [11], средней плотности (строка № 2, табл. 1).

В качестве модели гибкой подпорной стенки применялся лист оцинкованной стали толщиной 0,35 мм, шириной 155 мм, длиной 350 мм. Распорная система моделировалась брусками из фанеры сечением 10×10 мм, длиной 310 мм. В качестве пригрузки использовалась стальная гиря весом 2 кг.

Порядок испытаний предусматривал выполнение отсыпки модельного грунта до необходимого уровня в соответствии с принятой схемой испытания с параллельной установкой модели гибкой подпорной стенки, распорной системы. Для третьей серии опытных работ по мере устройства засыпки грунта производилось размещение разметочных линий.

До начала процесса фотографической съемки под стеклом внутри лотка размещались масштабные линейки для последующего определения масштаба. В процессе проведения опыта фиксировалось положение гибкой подпорной стенки, соответствующее различным характерным этапам. Последующая обработка заключалась в наборе операций. Производились отбор и сортировка полученных фотоизображений. Корректировалась дисторсия и прочие искажения (виньетирование, хроматические аберрации) объектива путем применения встроенных профилей Adobe, которые основываются на метаданных EXIF для конкретной модели фотокамеры и объектива. Далее при помощи графического программного обеспечения Adobe выполнялось ручное совмещение подготовленных фотоснимков, содержащих характерные этапы эксперимента и масштабные линейки, с последующим прямым измерением горизонтальных перемещений модели попиксельно.

Результаты экспериментальных исследований

В процессе проведения испытания, фотофиксации положения гибкой подпорной стенки и последующей обработки фиксировались горизонтальные перемещения подпорной конструкции.

В лабораторных условиях в соответствии с ГОСТ 12536-2014 [12] определялся гранулометрический состав песчаного грунта, применяемого в опытных исследованиях, и физические характеристики грунта засыпки в соответствии с ГОСТ 5180-2015 [13]. Результаты лабораторных исследований физических свойств грунтов сведены и представлены в табл. 1. Угол внутреннего трения песчаного грунта определялся путем прямого замера предельного угла заложения откоса для применяемых в опытах грунтов засыпки. Для указанных песков угол внутреннего трения составляет 30° .

Для обеспечения контроля и проверки адекватности полученных в результате бесконтактного способа измерения перемещений гибкой подпорной стенки в процессе проведения лабораторных исследований была выполнена серия численных экспериментов по аналогичным схемам и условиям в масштабе 1:1. Для этой задачи был задействован сертифицированный программный комплекс Plaxis 2D 2019.

Таблица 1

Результаты лабораторных исследований физических свойств грунтов

Table 1

Results of laboratory tests for physical properties of soils

№ п/п	Гранулометрический состав, %								При- родная влаж- ность	Плот- ность влажно- го грунта	Плот- ность сухого грунта	Плот- ность частиц грунта	Пори- стость	Коэф- фициент пористо- сти	Сте- пень влаж- ности	Наименование грунта по ГОСТ 25100-2020 «Грунты. Классификация» [11]
	Размер частиц, мм															
	> 10	10-5	5-2	2-1	1-0,5	0,5- 0,25	0,25- 0,1	< 0,1								
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	-	-	-	0,1	1,1	49,1	49,0	0,7	0,001	1,54	1,54	2,66	42,0	0,73	0,004	Песок средней крупности, рыхлый, малой степени водо- насыщения
2	-	-	-	-	7,2	65,2	26,0	1,6	0,001	1,63	1,63	2,66	38,7	0,63	0,004	Песок средней круп- ности, средней плот- ности, малой степени водонасыщения

Для получения эпюр давлений и внутренних усилий использовались полученные в ходе опытов значения горизонтальных перемещений стенки. Определение величин внутренних усилий, давлений и их распределение вдоль подпорной стенки выполнялось методом последовательного дифференцирования. При необходимости и для увеличения точности использовалось предварительное интерполирование и экстраполирование дифференцируемых функций.

На рис. 3 и 4 представлены эпюры давлений, полученные путем пересчета по методике, описанной выше, на основании экспериментально определенных в ходе испытаний значений горизонтальных перемещений стенок.

Проведение лотковых экспериментов и их последующая обработка позволили в целом подтвердить результаты опытных исследований прошлых лет [14–17]. Анализ эпюр бокового давления грунта, полученных пересчетом на основании экспериментально определенных значений горизонтальных перемещений стенок, позволяет сделать вывод о перераспределении давления грунта вдоль стенки в зависимости от характера ее деформаций. Эпюра давлений в случае консольной схемы близка по форме и величинам к теоретически расчетной

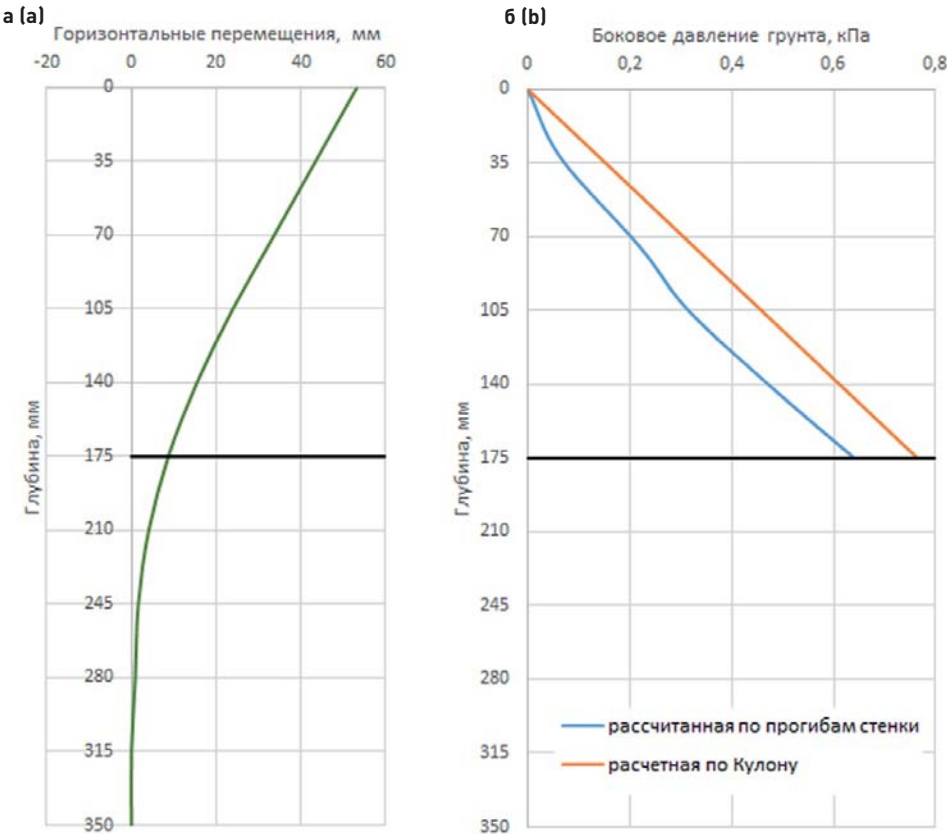


Рис. 3. Результаты экспериментальных исследований консольной стенки: а – эпюра прогибов; б – эпюра давления, рассчитанная по прогибам стенки в сопоставлении с эпюрой активного давления, определенного по классической теории Кулона

Fig. 3. Results of experimental tests of the cantilever wall: а – deflections diagram; б – pressure diagram computed from the wall deflections in comparison with active pressure diagram obtained by the classical Coulomb's theory

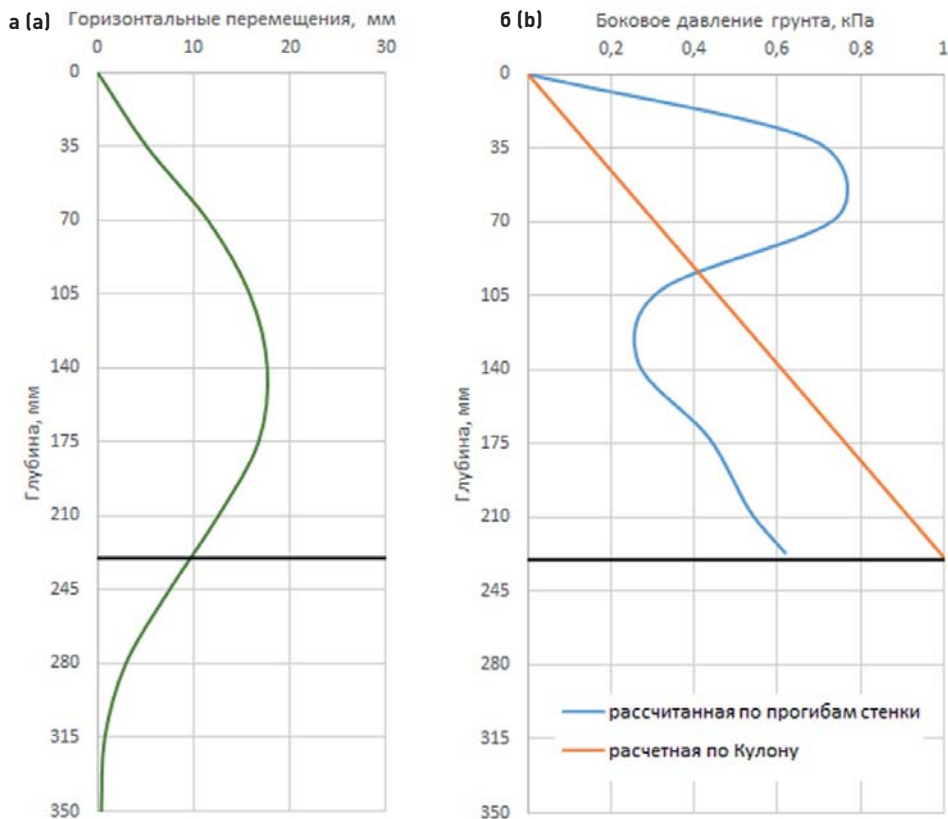


Рис. 4. Результаты экспериментальных исследований заанкеренной стенки: а – эпюра прогибов; б – эпюра давления, рассчитанная по прогибам стенки в сопоставлении с эпюрой активного давления, определенного по классической теории Кулона

Fig. 4. Results of experimental tests of the anchored wall: а – deflections diagram; б – pressure diagram computed from the wall deflections in comparison with active pressure diagram obtained by the classical Coulomb's theory

треугольной эпюре, полученной по методу Кулона (рис. 3). Опыты, проведенные по схеме с закреплением верхнего конца стенки, показывают, что экспериментальные эпюры давлений грунта отличаются от расчетных давлений, определяемых в соответствии с теорией Кулона (рис. 4). Отмечается следующий характер перераспределения давления:

- в верхних приопорных зонах, близких к местам распорного крепления, происходит концентрация давлений, при этом увеличение значений эпюр превышает давления, определенные по Кулону, приблизительно в 3 раза;
- в пролетной части наблюдается уменьшение эпюры давления приблизительно в 2 раза, ниже эпюра давлений снова увеличивается;
- размеры зон концентрации и уменьшения давлений и их положение по высоте вдоль стенки зависят от величины пролета подпорной конструкции.

Следует отметить, что суммарные площади эпюр давления грунта приблизительно равны эпюрам, полученным по методу Кулона, таким образом можно сделать вывод о том, что для стенки интегральное давление, полученное пересчетом методом последовательного

дифференцирования на основе зафиксированных горизонтальных перемещений стенки, соответствует по величине теоретическому, определенному по классическому методу.

Наибольший интерес представляет третья серия опытных работ, состоявшая из специальных испытаний, направленных на определение характера деформаций грунта в пределах призмы обрушения. В процессе исследований были получены результаты, описанные ниже.

Характер деформаций, зафиксированных при помощи разметочных линий, отсыпанных из окрашенного песка и по форме линии осадки поверхности засыпки (рис. 5), качественно соответствует картине изополей общих перемещений, полученных в серии численных экспериментов по аналогичным схемам и условиям (рис. 6). Принимая во внимание феноменологическую модель (рис. 1) и расчетную схему метода наклонных блоков, представленных в [10], и с учетом полученных в рамках лабораторного эксперимента фактических величин горизонтальных перемещений подпорной стенки можно выполнить геометрические построения, показанные на рис. 7, которые учитывают локальные смещения наклонных блоков грунта в зависимости от характера и величин деформаций опытной подпорной стенки.

На рис. 7 зеленая, красная и светло-желтая сплошные линии соответствуют положению разметочных линий в исходной схеме испытания. Пунктирные цветные линии соответствуют положению разметочных линий в деформированной схеме, полученной в ходе испытания (рис. 5). Голубые линии соответствуют ординатам величин горизонтальных перемещений стенки, измеренным в ходе испытания. Тонкими серыми и пунктирными черными линиями показано положение наклонных блоков, соответствующее исходной и деформированной схеме.

Проделанные геометрические построения (рис. 7) и их сопоставление с картиной экспериментальных исследований (рис. 5 и 6) отражают соответствие характера деформирования грунта засыпки в ходе лабораторных испытаний, в результате численного моделирования и для модели наклонных блоков с учетом различных характерных схем деформирования гибкой подпорной стенки, рассматриваемых в настоящей работе.

Заключение

В рамках настоящей статьи рассмотрены и проанализированы результаты экспериментальных и расчетных данных, полученных в процессе комплексного исследования поведения гибкой подпорной стенки и массива грунта засыпки за ней.

Сопоставление полученных в лабораторных условиях величин горизонтальных перемещений гибкой подпорной конструкции с данными численных расчетов показывает качественное соответствие опытных показателей с результатами численного моделирования, что подтверждает корректность подобранных схем испытаний и адекватность полученных в результате измерения перемещений гибкой подпорной стенки. Экспериментальные исследования в целом позволили показать и подтвердить тот факт, что различные по характеру деформации гибкой подпорной стенки влияют на распределение давлений по высоте. Эпюра давлений в случае консольной схемы близка по форме и величинам к теоретически расчетной треугольной эпюре, полученной по методу Кулона. Опытные схемы с закреплением верхнего конца стенки показывают, что экспериментальные эпюры давлений грунта отличаются от расчетных давлений, определяемых в соответствии с теорией Кулона. В приопорных зонах отмечается концентрация давлений, в пролетной части наблюдается уменьшение эпюры давления, ниже эпюра давлений снова увеличивается. Размеры и положение по высоте зон

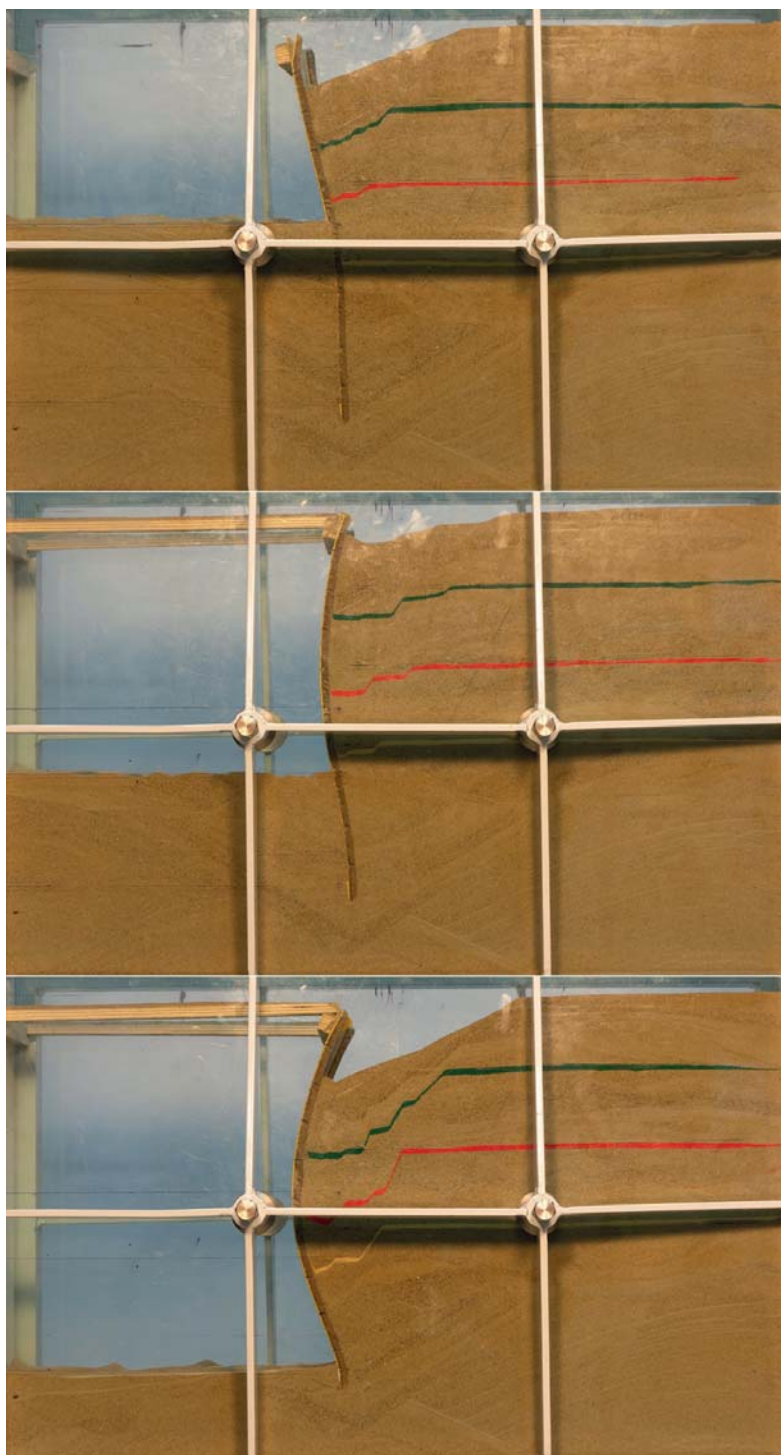


Рис. 5. Деформированные схемы, полученные для различных схем работы подпорной стенки
Fig. 5. Deformed models obtained for different retaining wall operations

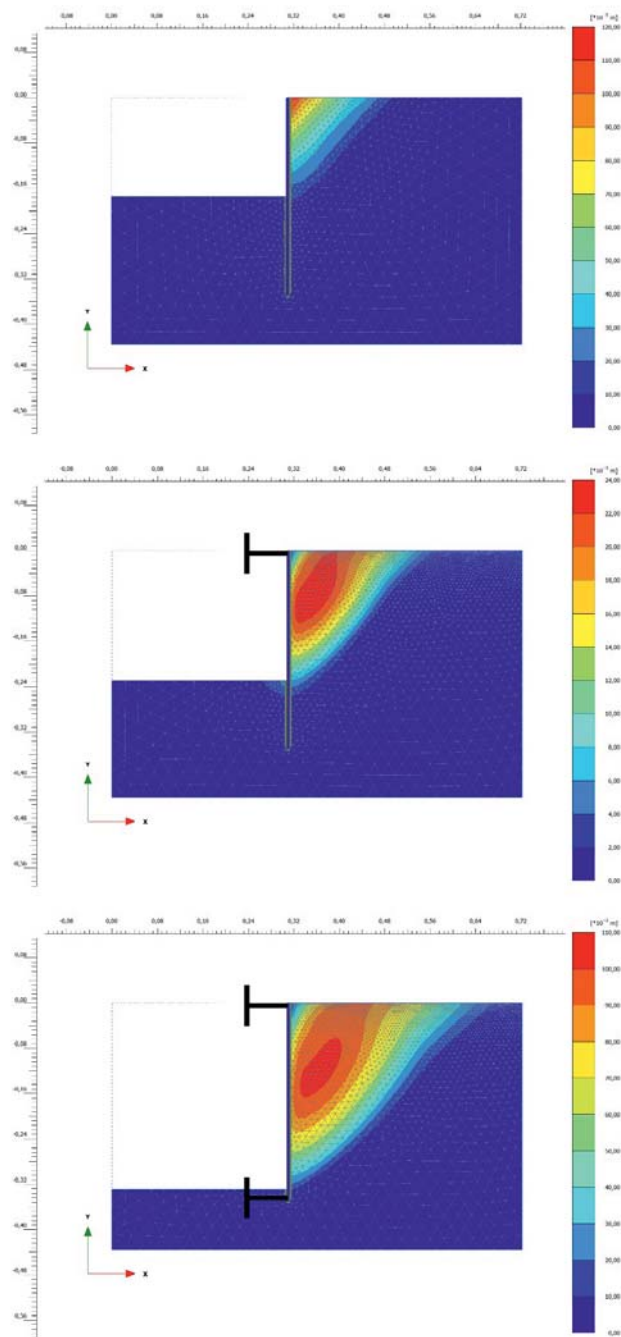


Рис. 6. Численное моделирование в Plaxis. Изополя общих перемещений в массиве грунта, полученных для схем работы подпорной стенки, соответствующих опытным

Fig. 6. Numerical simulation in Plaxis. Isofields of total displacements in the soil mass obtained for retaining wall operation models corresponding to the experimental ones

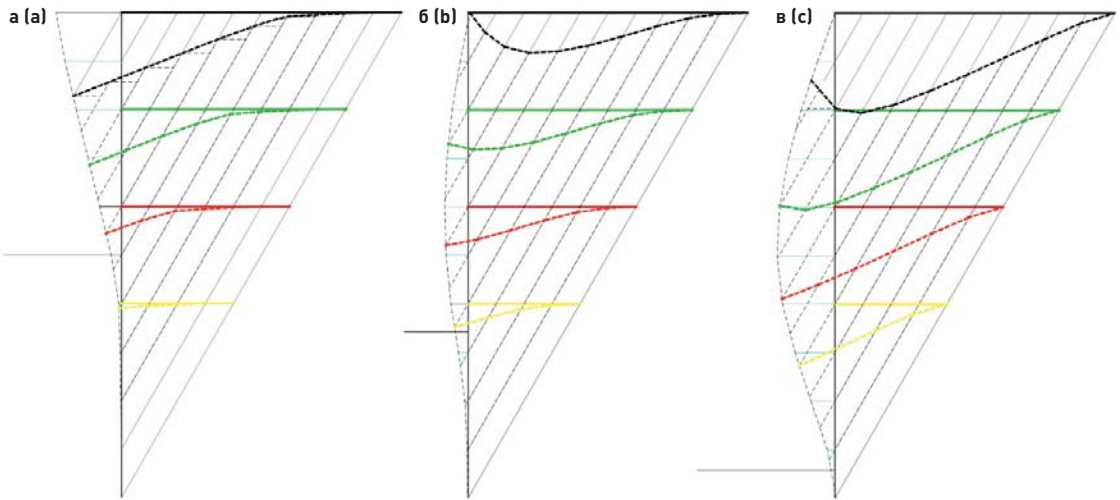


Рис. 7. Геометрические построения, соответствующие схемам опытных исследований и включающие в себя совмещение исходного и деформированного состояний подпорной стенки и массива грунта засыпки с учетом предлагаемой в [10] расчетной модели метода наклонных блоков: а – консольная стенка; б – стенка, закрепленная в верхней части распоркой; в – стенка, закрепленная в верхней и нижней частях распоркой

Fig. 7. Geometric constructions corresponding to the experimental models and including combination of the initial and deformed conditions of the retaining wall and the backfill soil mass taking into account the computational method of the inclined blocks proposed in [10]: а – cantilever wall; б – wall braced in the upper part; в – wall braced in the upper and lower parts

концентрации и уменьшения давлений вдоль стенки зависят от величин пролета подпорной конструкции.

Проделанные геометрические построения и их сопоставление с картиной экспериментальных исследований отражают соответствие характера деформирования грунта засыпки в ходе лабораторных испытаний, в результате численного моделирования и для модели наклонных блоков с учетом различных характерных схем деформирования гибкой подпорной стенки, рассматриваемых в настоящей работе.

Разработка инженерного численного метода определения бокового давления грунта в зависимости от характера деформирования гибкой подпорной конструкции с применением модели наклонных блоков грунта и с учетом их локальных смещений внутри призмы обрушения, в соответствии с проведенными экспериментальными исследованиями, является обоснованной.

Список литературы

1. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Фролов К.Е., Пашенко Ф.А., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования железобетонных подпорных стен. Природообустройство. 2020;(1):72–79. <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2020-1-72-79>
2. Saez E., Segaline H., Ubilla J., Llanquilef B. 1-G Experimental study of dynamic pressures and soil displacements in Yielding Rigid Retaining Walls using a transparent laminar box. Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Sydney; 2022, pp. 1193–1197.

3. Deng C., Haigh S.K. Sand deformation mechanisms mobilised with active retaining wall movement. *Geotechnique*. 2022;72(3):260–273. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.p.041>
4. Yang M., Tang X., Wu Z. Slip Surface and Active Earth Pressure of Cohesionless Narrow Backfill behind Rigid Retaining Walls under Translation Movement Mode. *International Journal of Geomechanics*. 2020;20(8):04020115. [https://doi.org/10.1061/\[asce\]gm.1943-5622.0001746](https://doi.org/10.1061/[asce]gm.1943-5622.0001746)
5. Xu L., Lin Y. Experimental Study on the Active Earth Pressure of Narrow Cohesionless Backfills against Rigid Retaining Wall under the Translation Mode. *Advances in Civil Engineering*. 2020;(7):1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8889749>
6. Бенмебарек Н., Лабди Х., Бенмебарек С. Численное исследование активного давления грунта на жесткую подпорную стенку при различных режимах перемещения. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 2016;(1):24.
7. Alavinezhad S.P., Shahir H. Determination of apparent earth pressure diagram for anchored walls in c-φ soil with surcharge. *World Journal of Engineering*. 2020;17(4):481–489. <https://doi.org/10.1108/wje-09-2019-0269>
8. Orazalin Z., Whittle A., Olsen M. Threedimension analyses of excavation support system for the strata center basement on the MIT campus. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2015;141(7):1–14. [https://doi.org/10.1061/\[asce\]gt.1943-5606.0001326](https://doi.org/10.1061/[asce]gt.1943-5606.0001326)
9. Sharma S., Vinod Prabhu N., Naveen Y., Bhuvaneshwari S. Numerical Modelling of Lateral Deformation of the Cantilever Retaining Wall in Expansive Clays. In: Saride S., Umashankar B., Avirneni D. (eds). *Advances in Geotechnical and Transportation Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 71. Springer, Singapore; 2020, pp. 233–247. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3662-5_19
10. Брыксин В.В. Расчет ограждающих конструкций котлованов методом наклонных блоков. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2018;17(2):35–49.
11. ГОСТ 25100-2020. Грунты. Классификация. Москва: Стандартинформ; 2020.
12. ГОСТ 12536-2014. Грунты. Методы лабораторного определения гранулометрического (зернового) и микроагрегатного состава. Москва: Стандартинформ; 2019.
13. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Стандартинформ; 2019.
14. Дуброва Г.А. Взаимодействие грунта и сооружений. Москва: Речной транспорт; 1963.
15. Лазебник Г.Е. Исследование распределения давления грунта на модели гибких одноанкерных подпорных стенок. *Основания, фундаменты и механика грунтов*. 1966;(2):3–5.
16. Rowe P.W. Anchored Sheet-Pile Walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1952;1(1):27–70. <https://doi.org/10.1680/iicep.1952.10942>
17. Гончаров Ю.М. Экспериментальное исследование взаимодействия шпунтового ограждения и грунта. В: *Механика грунтов. Труды Научно-исследовательского института оснований и подземных сооружений*. Сб. 43. Москва: Госстройиздат; 1961, с. 27–41.

References

1. Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E., Pashchenko F.A., Zyuzina O.V. Experimental studies of reinforced concrete retaining walls. *Prirodoobustroystvo*. 2020;(1):72–79. (In Russian). <https://doi.org/10.34677/1997-6011/2020-1-72-79>
2. Saez E., Segaline H., Ubilla J., Llanquilef B. 1-G Experimental study of dynamic pressures and soil displacements in Yielding Rigid Retaining Walls using a transparent laminar box. *Proceedings of the 20th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. Sydney; 2022, pp. 1193–1197.
3. Deng C., Haigh S.K. Sand deformation mechanisms mobilised with active retaining wall movement. *Geotechnique*. 2022;72(3):260–273. <https://doi.org/10.1680/jgeot.20.p.041>
4. Yang M., Tang X., Wu Z. Slip Surface and Active Earth Pressure of Cohesionless Narrow Backfill behind Rigid Retaining Walls under Translation Movement Mode. *International Journal of Geomechanics*. 2020;20(8):04020115. [https://doi.org/10.1061/\[asce\]gm.1943-5622.0001746](https://doi.org/10.1061/[asce]gm.1943-5622.0001746)
5. Xu L., Lin Y. Experimental Study on the Active Earth Pressure of Narrow Cohesionless Backfills against Rigid Retaining Wall under the Translation Mode. *Advances in Civil Engineering*. 2020;(7):1–9. <https://doi.org/10.1155/2020/8889749>

6. Benmebarek N., Labdi H., Benmebarek S. Numerical study of active soil pressure on a rigid retaining wall under various modes of movement. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 2016;(1):24. (In Russian).
7. Alavinezhad S.P., Shahir H. Determination of apparent earth pressure diagram for anchored walls in c-φ soil with surcharge. *World Journal of Engineering*. 2020;17(4):481–489. <https://doi.org/10.1108/wje-09-2019-0269>
8. Orazalin Z., Whittle A., Olsen M. Threedimension analyses of excavation support system for the strata center basement on the MIT campus. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2015;141(7):1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)gt.1943-5606.0001326](https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001326)
9. Sharma S., Vinod Prabhu N., Naveen Y., Bhuvaneshwari S. Numerical Modelling of Lateral Deformation of the Cantilever Retaining Wall in Expansive Clays. In: Saride S., Umashankar B., Avirneni D. (eds). *Advances in Geotechnical and Transportation Engineering. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol. 71. Springer, Singapore; 2020, pp. 233–247. https://doi.org/10.1007/978-981-15-3662-5_19
10. Bryksin V.V. Calculation of retaining walls by method of inclined blocks. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2018;17(2):35–49. (In Russian).
11. State Standard 25100-2020. Soils. Classification. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
12. State Standard 12536-2014. Soils. Methods of laboratory granulometric (grain-size) and microaggregate distribution. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
13. State Standard 5180-2015. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
14. Dubrova G.A. Interaction of soil and structures. Moscow: Rechnoi transport Publ.; 1963. (In Russian).
15. Lazebnik G.E. Investigation of the distribution of soil pressure on a model of flexible single-tank retaining walls. *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. 1966;(2):3–5. (In Russian).
16. Rowe P.W. Anchored Sheet-Pile Walls. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers*. 1952;1(1):27–70. <https://doi.org/10.1680/iicep.1952.10942>
17. Goncharov Yu.M. Experimental study of the interaction of sheet pile fencing and soil. In: *Soil mechanics. Proceedings of the Scientific Research Institute of Foundations and Underground Structures*. Vol. 43. Moscow: Gosstroizdat; 1961, pp. 27–41. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Виталий Владимирович Брыксин, старший научный сотрудник лаборатории методов расчета подземных сооружений и геотехнического прогноза, НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: geo.pgs@mail.ru

тел.: +7 (926) 581-94-28

Vitaly V. Bryksin, Senior Researcher, Laboratory of Methods for Calculating Underground Structures and Geotechnical Forecasting, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gershevich, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: geo.pgs@mail.ru

tel.: +7 (926) 581-94-28

УДК 691.327

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-118-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-118-130)

EDN: TXZVPH

ВЛИЯНИЕ ВИДА ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ПРОЧНОСТНЫЕ И ДЕФОРМАТИВНЫЕ СВОЙСТВА ВЫСОКОПРОЧНЫХ БЕТОНОВ ПРИ НАГРЕВЕ

И.С. КУЗНЕЦОВА✉, канд. техн. наук
Я.В. ЗУБОВА

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. Высокопрочный бетон широко используется в современном строительстве. С расширением внедрения высокопрочного бетона возникает необходимость изучения его поведения при высоких температурах (при пожаре) для обеспечения требуемой огнестойкости несущих железобетонных конструкций из высокопрочного бетона в части пожарной безопасности зданий и сооружений.

Цель: определение влияния вида заполнителя на прочностные и деформативные характеристики высокопрочного бетона класса В100 при нагреве до температур от 100 до 800 °С с шагом 100 °С.

Материалы и методы. Лабораторные испытания призмочной прочности и модуля упругости высокопрочного бетона на базальте и граните производили на образцах-призмах в нагретом состоянии по стандартным методикам при помощи специального нагревательного оборудования, совмещенного с лабораторным прессовым оборудованием.

Результаты. Определены коэффициенты условий работы при нагреве высокопрочного бетона на граните и базальте, характеризующие снижение прочности на сжатие и модуля упругости. Построены диаграммы деформирования при осевом сжатии высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве.

Выводы. Динамика снижения прочностных и деформативных свойств высокопрочного бетона на граните и базальте при нагреве аналогична и характерна для бетонов на силикатных заполнителях. Модули упругости высокопрочного бетона на базальте выше, чем у высокопрочного бетона на граните, как при 20 °С, так и при нагреве, что обуславливает зависимость деформативных свойств высокопрочного бетона от видов заполнителей. Диаграммы деформирования при осевом сжатии высокопрочного бетона на граните и базальте проявили специфический характер: однолинейный – при нагреве до температуры порядка 300–400 °С, двухлинейный – при более высоких температурах нагрева, что отличается от традиционных представлений и теоретических рекомендаций.

Ключевые слова: высокопрочный бетон, заполнители, базальт, гранит, температура, нагрев, модуль упругости, призмочная прочность, диаграммы деформирования, напряжения, деформации

Для цитирования: Кузнецова И.С., Зубова Я.В. Влияние вида заполнителей на прочностные и деформативные свойства высокопрочных бетонов при нагреве. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):118–130. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-118-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-118-130)

Вклад авторов

Авторы внесли равный вклад в постановку задачи, проведение исследований и оценку результатов.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.02.2024

Поступила после рецензирования 22.03.2024

Принята к публикации 28.03.2024

EFFECT OF AGGREGATE TYPE ON STRENGTH AND DEFORMATION PROPERTIES OF HIGH-STRENGTH CONCRETE DURING HEATING

I.S. KUZNETSOVA✉, Cand. Sci. (Engineering)
I.V. ZUBOVA

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. High-strength concrete is widely used in contemporary construction. Expanded introduction of high-strength concrete necessitates the need for studying its behavior at high temperatures (in case of fire) in order to ensure the required fire resistance of load-bearing reinforced concrete structures made of high-strength concrete in terms of fire safety of buildings and structures.

Aim. To determine the effect of aggregate types on strength and deformation characteristics of high-strength B100 concrete when heated to temperatures from 100 °C to 800 °C with a step of 100 °C.

Materials and methods. Laboratory tests of prism strength and elastic modulus of basalt and granite high-strength concrete were carried out on prism samples in a heated state according to standard methods using special heating equipment combined with laboratory pressure equipment.

Results. The authors determined structure behavior factors of basalt and granite high-strength concrete during heating, specifying the decrease in compressive strength and elastic modulus. Deformation diagrams during axial compression of high-strength granite and basalt concretes under heating were drawn.

Conclusions. The dynamics of reduction in strength and deformation properties is similar for granite and basalt high-strength concrete under heating and is specific for silicate aggregate concretes. The elastic moduli of basalt high-strength concrete are higher than those of granite high-strength concrete, both at 20 °C and when heated, thereby determining the dependence of high-strength concrete deformation properties on the types of aggregates. Deformation diagrams during the axial compression of high-strength granite and basalt concretes showed specific character: unilinear – when heated to temperatures of about 300–400 °C, bilinear – at higher heating temperatures, therefore differing from traditional ideas and theoretical recommendations.

Keywords: high-strength concrete, aggregates, basalt, granite, temperature, heating, elastic modulus, prism strength, deformation diagrams, stress, deformation

For citation: Kuznetsova I.S., Zubova I.V. Effect of aggregate type on strength and deformation properties of high-strength concrete during heating. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):118–130. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-118-130](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-118-130)

Authors contribution statement

All authors made equal contributions to problem statement, research development and evaluation of results.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 28.02.2024

Revised 22.03.2024

Accepted 28.03.2024

Современное массовое строительство в России, строительство высотных зданий, мостов, дорог, туннелей, очистных сооружений, потребует применения в больших объемах строительных материалов, в наибольшей степени подходящих по своим технико-экономическим показателям. В целом ряде случаев таким материалом может быть высокопрочный бетон (ВБ). Высокая механическая прочность, газо- и водонепроницаемость, коррозионная стойкость и стойкость к воздействию агрессивной среды, истиранию ставят этот материал в целом ряде случаев вне конкуренции при сравнении с традиционными строительными материалами.

Поведение обычного тяжелого бетона при высокотемпературном нагреве изучено достаточно широко. Результаты множественных исследований [1–3] систематизированы и приведены в СП 468.1325800.2019 [4] в виде значений коэффициентов условий работы при нагреве для расчета огнестойкости и в охлажденном состоянии после нагрева для расчета огнесохранности для бетонов класса по прочности на сжатие не выше В55. Такое ограничение класса прочности неслучайно.

Исследованиями многих российских и зарубежных авторов доказано, что изменчивость прочностных и деформативных свойств ВБ отличается от обычных тяжелых бетонов. При этом наблюдается достаточно большой разброс значений снижения прочности ВБ при пожаре (рис. 1), а отклонения от условного среднего значения достигают 50 %. Экспериментально установлено, что прочность ВБ при нагреве в меньшей степени зависит от первоначального значения прочности до нагрева. Такой разброс значений, как правило, связывают с различиями вещественно-количественных составов ВБ, типа заполнителей, минеральных добавок, методик приложения силовой и температурной нагрузки.

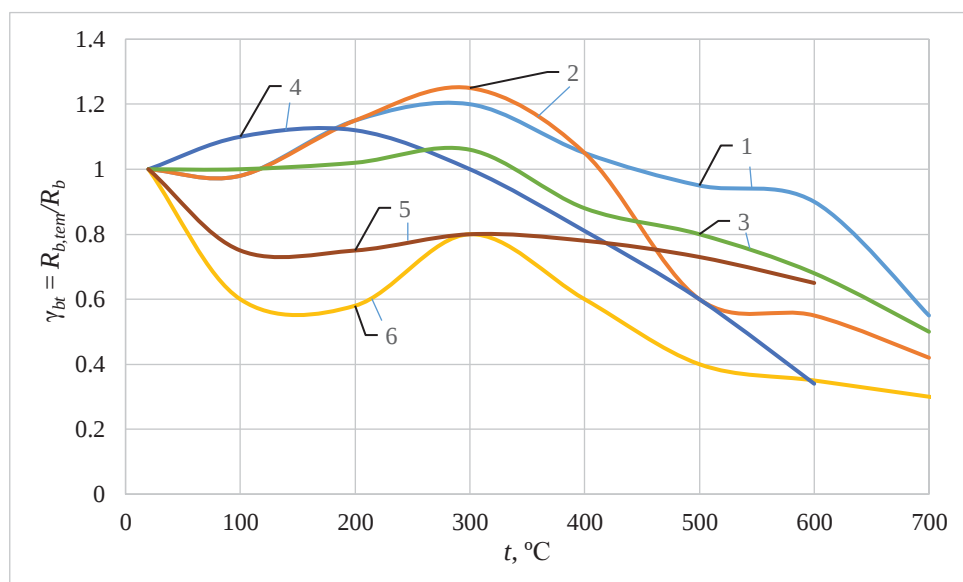


Рис. 1. Изменение прочности на сжатие высокопрочного бетона после кратковременного нагрева: 1 – Леонович С. Н. (с добавлением 10 % микрокремнезема) [5]; 2 – Леонович С. Н. (без микрокремнезема) [5]; 3 – Леонович С. Н. (с добавлением стальной фибры) [6]; 4 – состав Kirchhof L. D. [7]; 5 – состав Phan L. T. [8]; 6 – состав Yoon M. [9]

Fig. 1. Change in compressive strength of high-strength concrete after short-term heating: 1 – Leonovich S. N. (with 10 % of microsilica) [5]; 2 – Leonovich S. N. (without microsilica) [5]; 3 – Leonovich S. N. (with steel fiber) [6]; 4 – Kirchhof L. D., composition [7]; 5 – Phan L. T., composition [8]; 6 – Yoon M., composition [9]

Анализ исследований разных авторов показал, что наибольшее внимание уделяется влиянию модифицирующих тонкомолотых добавок на свойства высокопрочного бетона при нагреве. Влияние вида крупного заполнителя на изменчивость свойств ВБ при нагреве недостаточно изучено.

В некоторых работах авторы исследовали высокопрочные бетоны с модифицирующими тонкомолотыми добавками на гранитном и известняковом заполнителях. Исследований высокопрочных бетонов на базальтовом заполнителе не обнаружено.

В работе [10] авторами приведены результаты испытаний при нагреве в интервале температур 20–900 °С высокопрочных бетонов классов В75–В100 на гранитном заполнителе с тонкомолотыми модифицирующими добавками в виде микрокремнезема, золы-уноса, гранулированного доменного шлака. По результатам исследований установлено, что все три вида исследуемых высокопрочных бетонов имеют схожую динамику снижения прочности на сжатие при нагреве. При сравнении прочностных характеристик при нагреве обычных тяжелых бетонов и исследуемых высокопрочных бетонов отмечено резкое снижение прочности высокопрочных бетонов на 30 % при 150 °С, в то время как обычные тяжелые бетоны не теряют прочностные свойства до 350 °С.

Авторы работы [11] изучали влияние температуры нагрева до 400 °С высокопрочного бетона, содержащего добавку МБ 10-50С, состоящую из микрокремнезема, золы-уноса и суперпластификатора С-3, на гранитном заполнителе. В результате работы авторами отмечено увеличение прочности на сжатие при кратковременном нагреве до 200 и 300 °С по сравнению с прочностью при 20 °С на 15 и 4 % соответственно. Схожие результаты получены для высокопрочного бетона аналогичного состава авторами статьи из Бразилии [7], которые исследовали влияние влажности и температуры нагрева на прочностные характеристики и вероятность взрывообразного разрушения обычного тяжелого и высокопрочного бетонов. Похожее явление также наблюдали авторы [12], которые исследовали высокопрочные бетоны на гранитном заполнителе с активными добавками в виде микрокремнезема, золы-уноса и тонкомолотого гранулированного доменного шлака.

В статьях коллег из Республики Беларусь [5, 6] приведены результаты исследований прочностных и деформативных характеристик высокопрочных бетонов на гранитном заполнителе с учетом влияния различных пластифицирующих добавок, микрокремнезема и стальной фибры на прочность при сжатии, модуль упругости и вязкость разрушения при нагреве до 800 °С. Авторами исследований отмечено, что при нагреве до 350–400 °С в 30 % случаев происходит взрывообразное разрушение образцов во время испытания. Зависимости снижения прочности высокопрочных бетонов при нагреве имеют разную тенденцию (рис. 1).

Авторами настоящей статьи приведены результаты исследований прочностных и деформативных характеристик высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном и базальтовом заполнителях при кратковременном нагреве от 100 до 800 °С с шагом 100 °С.

Методы испытания. Вещественный состав бетонных смесей исследованных высокопрочных бетонов приведен в табл. 1.

Изготовление бетонных образцов осуществлялось по ГОСТ 10180-2012 [13] с последующей выдержкой в камере нормального твердения в течение 28 суток. На образцах-кубах размерами 100 × 100 × 100 мм контролировался класс по прочности на сжатие ВБ.

Исследования призмочной прочности R_b и модуля упругости E_b высокопрочных бетонов класса В100 на граните и базальте при нагреве проводили по методике ГОСТ 24452-80 [14]

Таблица 1

Вещественный состав бетонных смесей

Table 1

Material composition of concrete mixtures

В100 на граните	В100 на базальте
Портландцемент ЦЕМ 052,5Н	Портландцемент ЦЕМ 052,5Н
Микрокремнезем уплотненный МКУ-85	Микрокремнезем уплотненный МКУ-85
Тонкомолотый гранулированный доменный шлак	Тонкомолотый гранулированный доменный шлак
Песок природный	Песок природный
Щебень фр. 4–8 мм (гранит)	Щебень фр. 5–10 мм (базальт)
Вода	Вода
Хим. добавка – суперпластификатор	Хим. добавка – суперпластификатор
В/Вяз = 0,24	В/Вяз = 0,25

Примечание. Содержание микрокремнезема в составе бетонной смеси не более 10 % от массы вяжущего.

на образцах-призмах размерами 70 × 70 × 280 мм. Перед испытаниями на осевое сжатие производился кратковременный нагрев образцов-призм в муфельной печи до заданной температуры с изотермической выдержкой в течение одного часа (рис. 2).

Следует отметить, что предварительный нагрев опытных бетонных образцов подтвердил склонность высокопрочных бетонов к взрывообразному разрушению и обусловил необходимость снижения скорости нагрева образцов (не более 50 °С/час) в процессе испытаний.

Диапазон исследованных температур находился в интервале от 100 до 800 °С с шагом 100 °С. Нагружение образцов-призм в нагретом состоянии производили ступенчато (прибавляя 10 % от разрушающей нагрузки на каждой ступени) до уровня 40 % от разрушающей нагрузки – для определения модуля упругости и до разрушения – для определения призмочной прочности.



Рис. 2. Общий вид установки для испытаний бетонов при кратковременном нагреве
Fig. 2. General view of the concrete test unit for short-term heating

По результатам испытаний построены графические зависимости коэффициентов условий работы γ_{bt} и β_b , характеризующих динамику изменчивости призмочной прочности (рис. 3) и модуля упругости (рис. 4) высокопрочных бетонов на граните и базальте, от температуры кратковременного нагрева.

Анализ результатов испытаний призмочной прочности при кратковременном нагреве высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном и базальтовом заполнителях показал следующее (рис. 3). Кратковременный нагрев до температуры 100 °С приводит к снижению призмочной прочности исследуемых высокопрочных бетонов класса В100 на 20 % независимо от вида заполнителя. Снижение призмочной прочности высокопрочных

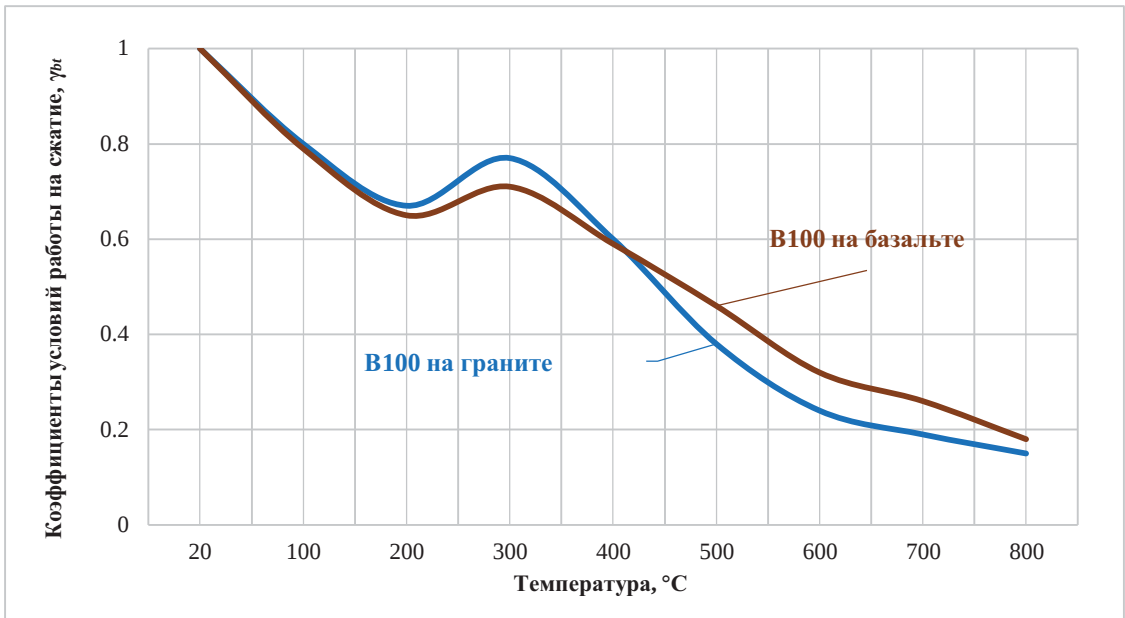


Рис. 3. Динамика изменения прочности на сжатие высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве
Fig. 3. Dynamics of changes in compressive strength of high-strength granite and basalt concretes under heating

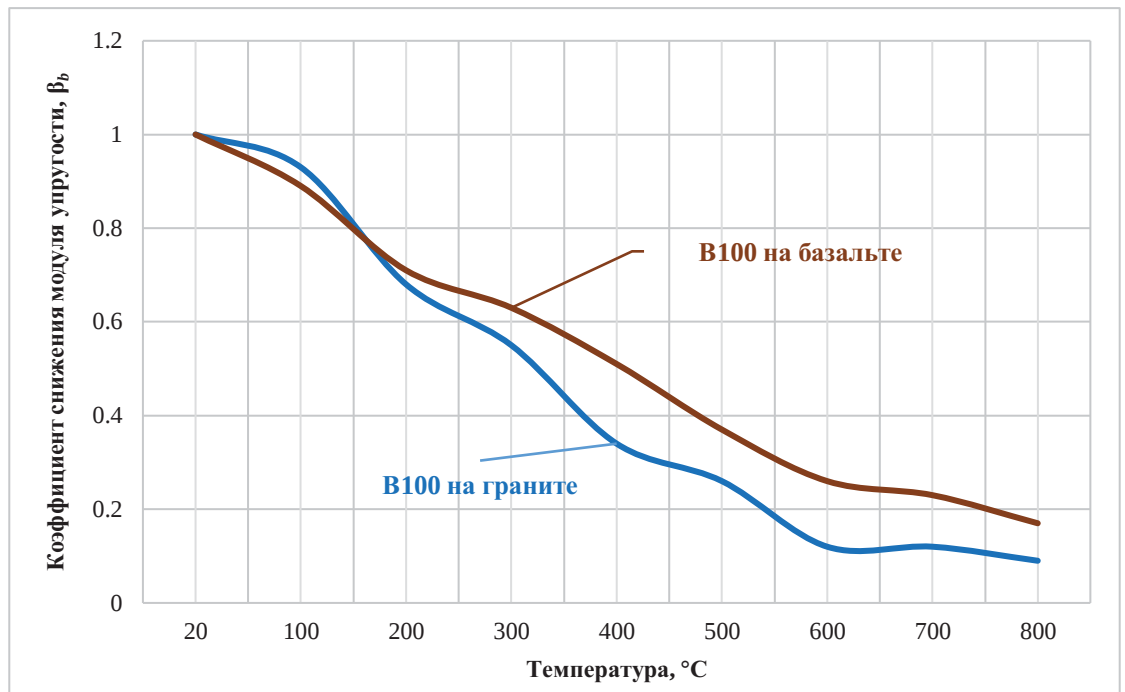


Рис. 4. Динамика изменения модуля упругости высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве
Fig. 4. Dynamics of changes in elastic modulus of high-strength granite and basalt concretes under heating

бетонов при нагреве порядка 100 °С можно объяснить адсорбционным снижением прочности цементного камня. При нагревании бетона происходит более глубокое проникновение воды в микротрещины и микропоры структуры цементного камня, вследствие чего увеличивается истинная поверхность цементного камня, покрытая адсорбционным слоем воды, следовательно, уменьшается поверхностная энергия кристаллов цементного камня, способствуя возникновению и развитию существующих микротрещин при действии на бетон внешней нагрузки.

Дальнейший нагрев до температуры 200 °С также снижает призмную прочность ВБ на 35 % от первоначальной до нагрева.

В процессе испытаний была отмечена специфика поведения высокопрочных бетонов при кратковременном нагреве. Во всех опытах после нагрева до порядка 100–200 °С при открытии двери печи отмечалось интенсивное выделение в окружающую среду парогазовой смеси сизого цвета с едким запахом, характерным для сгорания органических соединений. При испытаниях контрольных образцов из обычного тяжелого бетона на портландцементе подобное явление не наблюдалось. Следовательно, можно предположить, что в диапазоне температур нагрева от 100 до 200 °С происходит выгорание компонентов химических добавок, используемых при изготовлении бетонной смеси высокопрочных бетонов. Данная особенность вызывает дополнительное нарушение межкристаллических связей в цементном камне за счет этого выгорания и приводит к дополнительному снижению призмной прочности бетона.

При последующем нагреве в интервале температур от 200 до 300 °С выявлено некоторое упрочнение высокопрочных бетонов. При 300 °С фактическая призмная прочность высокопрочных бетонов (от первоначальной до нагрева) составила: на граните – 75 %, на базальте – 70 %. Упрочнение высокопрочных бетонов в интервале температур 200–300 °С объясняется повышением прочности цементного камня за счет уплотнения его структуры вследствие удаления воды, адсорбированной гелем двухкальциевого силиката, а также усиленной кристаллизацией $\text{Ca}(\text{OH})_2$, упрочняющей цементный камень.

При нагреве свыше 300 °С наблюдалась устойчивая тенденция к снижению призмной прочности высокопрочных бетонов, что связано с нарушением структуры затвердевшего портландцемента из-за усиливающейся разнозначности деформаций гелеобразной части цементного камня и неразложившихся зерен цементного клинкера, а также из-за дегидратации $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Кроме того, одной из основных причин снижения прочности ВБ является возникновение дополнительных напряжений, обуславливающих нарушение связей между заполнителем и цементным камнем вследствие того, что затвердевший цемент, обезвоживаясь, дает усадку, а зерна заполнителя расширяются.

Интенсивность снижения призмной прочности вполне сопоставима для высокопрочных бетонов на граните и базальте. При этом призмная прочность на сжатие высокопрочных бетонов на базальтовом заполнителе при нагреве в интервале температур 500–700 °С на 20–25 % выше, чем у высокопрочного бетона на гранитном заполнителе, что связано с большей устойчивостью базальтового заполнителя к высоким температурам. При нагреве в указанном диапазоне температур базальтовый заполнитель практически не меняет свойства, в то время как гранитный заполнитель претерпевает полиморфные превращения структуры при температуре 573 °С с увеличением объема и растрескиванием.

При температуре нагрева 800 °С призмная прочность высокопрочного бетона на гранитном заполнителе составила 15 %, на базальтовом заполнителе – 20 % от призмной прочности до нагрева. Преимущество базальтового заполнителя связано с его высокой термостойкостью и первоначально более высокой прочностью базальтового заполнителя по отношению к гранитному заполнителю.

Результаты испытаний модуля упругости высокопрочных бетонов при нагреве приведены в табл. 2 и 3 и на рис. 5.

Анализ результатов испытаний модуля упругости при кратковременном нагреве высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном и базальтовом заполнителях показал следующее (рис. 4). Начальный модуль упругости при сжатии в возрасте 28 суток высокопрочного бетона класса В100 на гранитном заполнителе меньше начального модуля упругости высокопрочного бетона класса В100 на базальтовом заполнителе на 12 %, что связано с наибольшей начальной прочностью базальтового заполнителя.

При кратковременном нагреве модули упругости при сжатии исследованных видов высокопрочных бетонов снижаются. Интенсивность снижения модулей упругости высокопрочных бетонов на граните и базальте близка по динамике, но при этом значения модулей упругости высокопрочного бетона на базальтовом заполнителе значительно выше, чем на гранитном.

При нагреве до температуры 100 °С модули упругости при сжатии E_{bt} высокопрочных бетонов на гранитном и на базальтовом заполнителях снизились примерно на 7 и 11 % от начального значения до нагрева соответственно. При нагреве до температуры 300 °С отмечено снижение на 45 и 37 % от начального значения до нагрева соответственно, а при нагреве до 500 °С модули упругости снизились на 74 и 63 % от начального значения до нагрева соответственно.

При нагреве в интервале температур от 300 до 800 °С наибольшая тенденция снижения модуля упругости проявилась для высокопрочного бетона на гранитном заполнителе.

Таблица 2

Результаты испытания модуля упругости высокопрочного бетона класса В100 на гранитном заполнителе при кратковременном нагреве

Table 2

Test results for elastic modulus of high-strength B100 concrete with granite aggregate under short-term heating

№ п/п	Температура, °С	Среднее значение модуля упругости, E_{bt} , МПа	Коэффициент снижения модуля упругости, β_e
1	20	52 829	1,00
2	100	49 133	0,93
3	200	35 800	0,68
4	300	28 832	0,55
5	400	17 779	0,34
6	500	13 680	0,26
7	600	6 189	0,12
8	700	6 086	0,12
9	800	4 871	0,09

Таблица 3

Результаты испытания модуля упругости высокопрочного бетона класса В100 на базальтовом заполнителе при кратковременном нагреве

Table 3

Test results for elastic modulus of high-strength B100 concrete with basalt aggregate under short-term heating

№ п/п	Температура, °С	Среднее значение модуля упругости, E_{br} , МПа	Коэффициент снижения модуля упругости, B_b
1	20	59 276	1,00
2	100	52 473	0,89
3	200	42 210	0,71
4	300	37 146	0,63
5	400	29 959	0,51
6	500	22 145	0,37
7	600	15 525	0,26
8	700	13 424	0,23
9	800	10 062	0,17

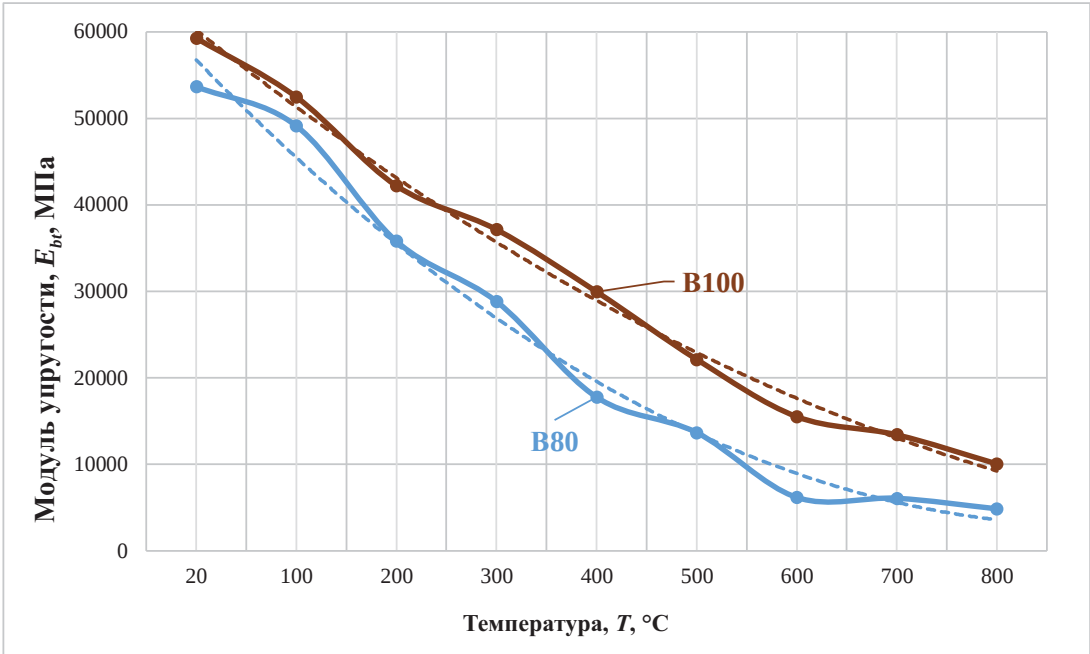


Рис. 5. Результаты испытаний модуля упругости при сжатии высокопрочных бетонов класса В100 на гранитном заполнителе и на базальтовом заполнителе при кратковременном нагреве
Fig. 5. Test results for elastic modulus when compressing high-strength B100 concrete with granite aggregate under short-term heating

Уменьшение модулей упругости высокопрочных бетонов происходит за счет повышения деформативности бетона и увеличения их упругих деформаций, а также за счет снижения призмной прочности при нагреве. Увеличение деформативности высокопрочных бетонов при нагреве связано с нарушениями и изменениями структуры высокопрочных бетонов.

Полученные тенденции изменчивости прочностных и деформативных свойств ВБ на граните и базальте имеют хорошее совпадение с результатами, изложенными в статье корейских коллег [9].

По результатам лабораторных испытаний построены диаграммы деформирования высокопрочных бетонов при нагреве в диапазоне температур от 100 до 800 °С, которые приведены на рис. 6 и 7. Анализ диаграмм по зависимости «напряжения – деформации» ($\sigma - \epsilon$) показывает, что до температур нагрева порядка 400 °С зависимости ($\sigma - \epsilon$) для исследованных видов ВБ носят практически линейный характер (однолинейная диаграмма), а двухлинейный характер диаграмм деформирования начинает проявляться при нагреве свыше 500 °С.

Предельные деформации сжатия высокопрочного бетона на граните больше, чем высокопрочного бетона на базальте. При нагреве до 100 °С относительные предельные деформации сжатия ϵ_{b2} ВБ на граните составили $2,4 \times 10^{-3}$, ВБ на базальте – $1,9 \times 10^{-3}$. При нагреве до 200 °С относительные предельные деформации сжатия ϵ_{b2} ВБ на граните и базальте составили соответственно $2,6 \times 10^{-3}$ и $2,3 \times 10^{-3}$, при нагреве до 400 °С – соответственно $3,9 \times 10^{-3}$ и $3,0 \times 10^{-3}$, при нагреве до 800 °С – соответственно $5,6 \times 10^{-3}$ и $4,4 \times 10^{-3}$. В целом предельные деформации сжатия ϵ_{b2} высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве почти в 2 раза превысили теоретические предельные деформации ϵ_{b2} , установленные в СП 63.13330.2018 [15] для ВБ класса по прочности на сжатие В100 (0,0028) при нормальной температуре.

Предельные деформации сжатия ϵ_{b2} высокопрочных бетонов на гранитном и базальтовом заполнителях при нагреве изменяются по линейному закону.

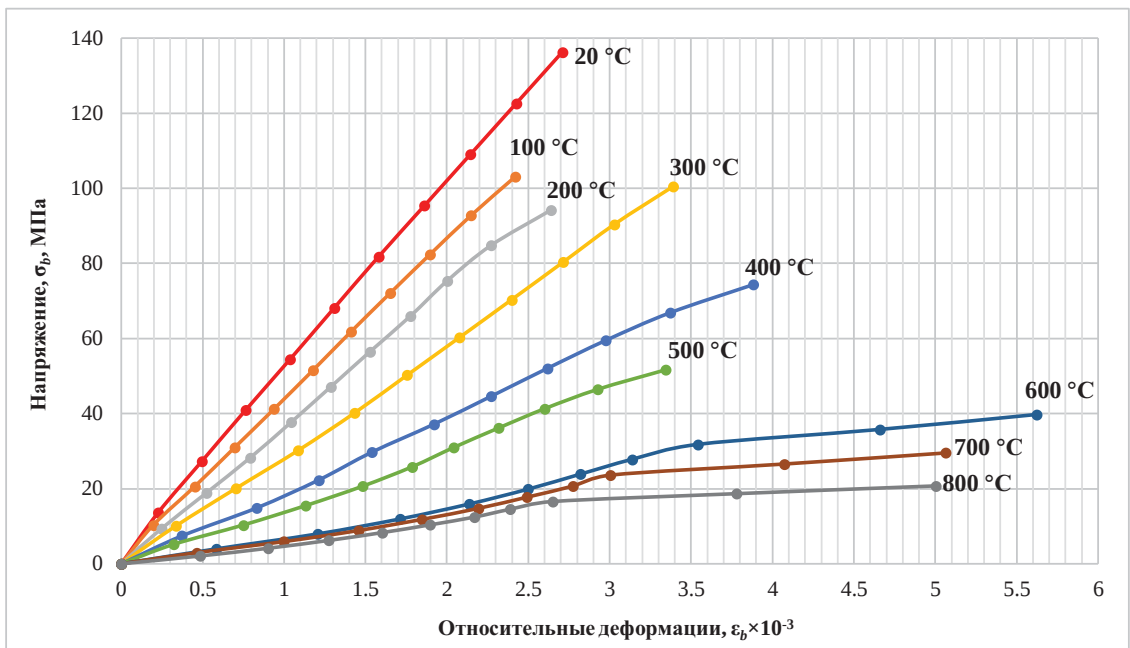


Рис. 6. Диаграммы деформирования высокопрочного бетона класса В100 на граните
Fig. 6. Diagrams of deformation of high-strength B100 granite concrete

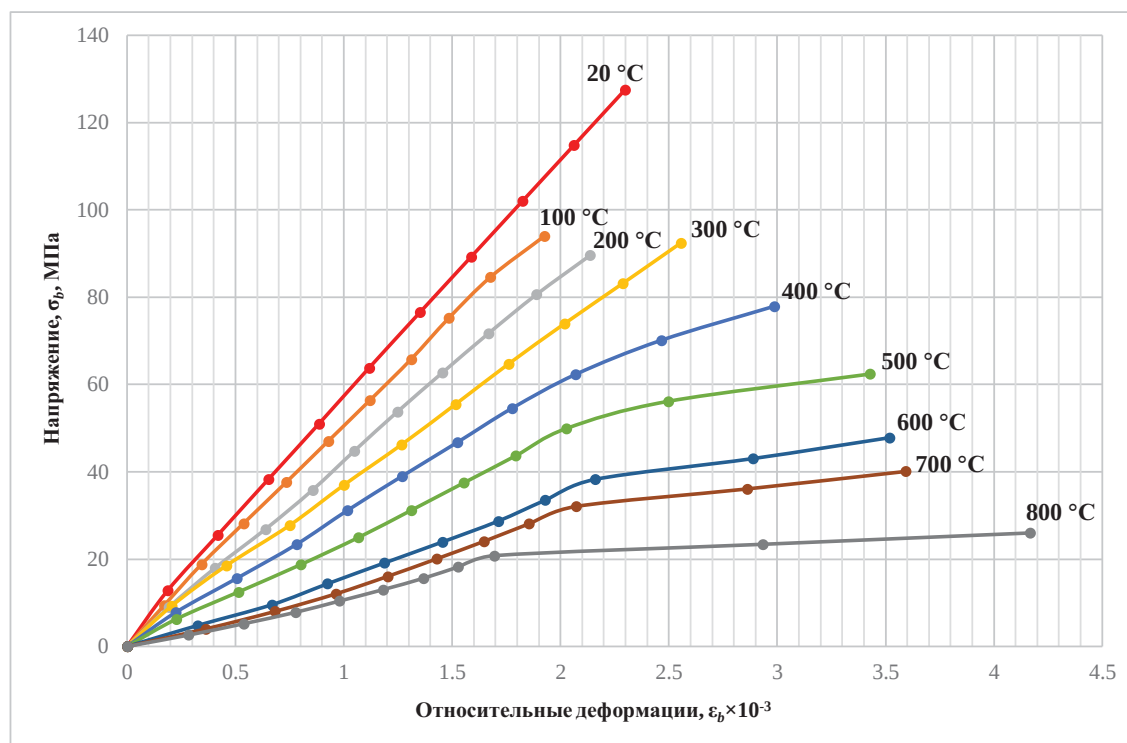


Рис. 7. Диаграммы деформирования высокопрочного бетона класса В100 на базальте

Fig. 7. Diagrams of deformation of high-strength B100 basalt concrete

Заключение

1. Экспериментальные коэффициенты условий работы γ_{bt} и β_b высокопрочных бетонов класса по прочности на сжатие В100 на гранитном и базальтовом заполнителях могут быть рекомендованы для расчетов огнестойкости железобетонных конструкций, изготовленных из этих видов бетонов.

2. Влияние вида заполнителя (базальта и гранита) на динамику изменчивости прочностных свойств высокопрочного бетона незначительное, поскольку базальт и гранит относятся к группе силикатных заполнителей, а полученные экспериментальные данные имеют небольшой разброс значений (в пределах 10–12%).

3. При нагреве свыше 200 °C заметна тенденция к увеличению разницы значений модуля упругости между высокопрочными бетонами класса по прочности на сжатие В100 на гранитном и базальтовом заполнителях. Модуль упругости высокопрочного бетона на базальте менее интенсивно снижается при нагреве и имеет более высокие значения по отношению к модулю упругости высокопрочного бетона на граните.

4. Диаграммы деформирования ВБ на граните и базальте при нагреве до 400 °C носят упругий однолинейный характер, а при нагреве свыше 500 °C – двухлинейный характер.

5. Предельные деформации сжатия ϵ_{b2} высокопрочных бетонов на граните и базальте при нагреве почти в 2 раза превышают теоретические предельные деформации ϵ_{b2} , установленные в СП 63.13330.2018 [15] для ВБ класса по прочности на сжатие В100 (0,0028) при нормальной температуре, что свидетельствует о необходимости продолжения

исследований высокопрочных бетонов разных видов с построением диаграмм деформирования по зависимости ($\sigma - \epsilon$) при нагреве для создания банка исходных данных и разработки диаграммного метода расчета огнестойкости железобетонных конструкций из высокопрочных бетонов.

Список литературы

1. Некрасов К.Д., Жуков В.В., Гуляева В.Ф. Тяжелый бетон в условиях повышенных температур. Москва: Стройиздат; 1972.
2. Милованов А.Ф. Стойкость железобетонных конструкции при пожаре. Сопротивление железобетонных конструкций при пожаре. Москва: Стройиздат; 1998.
3. Schneider U. Concrete at high temperatures - A general review. Journal of Fire Safety. 1988;13(1):55–68. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1)
4. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. Москва: Стандартинформ; 2020.
5. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона при нагреве. Вестник БНТУ. 2011;(4):30–34.
6. Леонович С.Н., Литвиновский Д.А. Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуры. Строительные материалы. 2017;(11):12–17.
7. Kirchhof L.D., Lima R.C.A., Santos A.B., Quispe A.C., Silva Filho L.C.P. Effect of moisture content on the behavior of high strength concrete at high temperatures. Matéria (Rio de Janeiro). 2020;25(1):e-12573. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0898>
8. Phan L.T., Carino N. Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures [internet]. NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology; 2001. Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860330
9. Yoon M., Kim G., Kim Y., Lee T., Choe G., Hwang E., Nam J. Creep behavior of high-strength concrete subjected to elevated temperatures. Materials. 2017;10(7):781. <https://doi.org/10.3390/ma10070781>
10. Diederichs U., Jumppanen U.M., Penttala V. Behavior of high strength concrete at high temperatures. Report No. 92. Department of Structural Engineering, Helsinki University of Technology; 1989.
11. Baranov A.O., Zorina E.A., Kirian I.V. Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete with Fly Ash and Silica Fume at Elevated Temperatures: The Influence of Heating Duration. Construction of Unique Buildings and Structures. 2021;96:9601.
12. Poon C.S., Azhar S., Anson M., Wong Y.L. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. Cement and Concrete Research. 2001;31(9):1291–1300. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00580-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00580-4)
13. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ; 2012.
14. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Стандартинформ; 2008.
15. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003. Москва: Стандартинформ; 2019.

References

1. Nekrasov K.D., Zhukov V.V., Gulyaeva V.F. Heavy concrete at elevated temperatures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1972. (In Russian).
2. Milovanov A.F. Resistance of reinforced concrete structures in case of fire. Resistance of reinforced concrete structures in case of fire. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1998. (In Russian).
3. Schneider U. Concrete at high temperatures - A general overview. Journal of Fire Safety. 1988;13(1):55–68. [https://doi.org/10.1016/0379-7112\(88\)90033-1](https://doi.org/10.1016/0379-7112(88)90033-1)

4. SP 468.1325800.2019. Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring of fire resistance and fire safety. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. [In Russian].
5. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. Analytical dependences of strength, deformative, force and energy parameters of high-strength concrete under heating. Vestnik BNTU. 2011;(4):30–34. [In Russian].
6. Leonovich S.N., Litvinovsky D.A. The fracture toughness of high-strength concrete after exposure to high temperature. Stroitel'nye Materialy = Construction Materials. 2017;(11):12–17. [In Russian].
7. Kirchhof L.D., Lima R.C.A., Santos A.B., Quispe A.C., Silva Filho L.C.P. Effect of moisture content on the behavior of high strength concrete at high temperatures. Matéria (Rio de Janeiro). 2020;25(1):e-12573. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620200001.0898>
8. Phan L.T., Carino N. Mechanical properties of high-strength concrete at elevated temperatures [internet]. NISTIR 6726, National Institute of Standards and Technology; 2001. Available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860330
9. Yoon M., Kim G., Kim Y., Lee T., Choe G., Hwang E., Nam J. Creep behavior of high-strength concrete subjected to elevated temperatures. Materials. 2017;10(7):781. <https://doi.org/10.3390/ma10070781>
10. Diederichs U., Jumppanen U.M., Penttala V. Behavior of high strength concrete at high temperatures. Report No. 92. Department of Structural Engineering, Helsinki University of Technology; 1989.
11. Baranov A.O., Zorina E.A., Kirian I.V. Mechanical Characteristics of High-Strength Concrete with Fly Ash and Silica Fume at Elevated Temperatures: The Influence of Heating Duration. Construction of Unique Buildings and Structures. 2021;96:9601.
12. Poon C.S., Azhar S., Anson M., Wong Y.L. Comparison of the strength and durability performance of normal- and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. Cement and Concrete Research. 2001;31(9):1291–1300. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(01\)00580-4](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(01)00580-4)
13. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ.; 2012. [In Russian].
14. State Standard 24452-80. Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination. Moscow: Standartinform Publ.; 2008. [In Russian].
15. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. SNIP 52-01-2003. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. [In Russian].

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Сергеевна Кузнецова✉, канд. техн. наук, заведующая лабораторией температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1747139@mail.ru

Irina S. Kuznetsova✉, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Temperature Resistance and Diagnosis 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: 1747139@mail.ru

Яна Владимировна Зубова, аспирант, ведущий инженер лаборатории температуростойкости и диагностики бетона и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1747139@mail.ru

Iana V. Zubova, Graduate Student, Leading Engineer of the Laboratory of Temperature Resistance and Diagnostics 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: 1747139@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.32

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-131-147)

EDN: YCCZKZ

ПОЛУЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ОТХОДОВ СЕРНОКИСЛОТНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

С.В. СОКОЛОВА^{1,✉}, канд. техн. наукЮ.В. СИДОРЕНКО², канд. техн. наук¹ ФГБОУ ВО «Самарский государственный университет путей сообщения», ул. Свободы, д. 2в, г. Самара, 443066, Российская Федерация² ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», ул. Молодогвардейская, д. 244, г. Самара, 443100, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Решение актуальной проблемы получения бетонов специального назначения с применением отдельных разновидностей некондиционного природного сырья и ряда промышленных отходов позволит внедрить принципы ресурсосбережения и усовершенствовать технологические особенности производства.

Целью данной работы является комплексная оценка влияния отходов сернокислотного производства и некондиционного природного глинистого сырья на получение качественных и долговечных бетонов специального назначения.

Материалы и методы. Сырьем для производства керамзитового гравия служат легкоплавкие глинистые породы. Были применены добавки органические (соляровое масло) и железистые (пиритные огарки). Для определения кристаллических фаз, содержащихся в глине Никольского месторождения, в полученном керамзитовом гравии, а также с целью анализа заводских валовых проб пиритных огарков производился рентгеновский анализ. Для получения в лабораторных условиях высокопрочного керамзитового гравия использовалась трубчатая электрическая печь для обжига по двухступенчатому режиму 700 и 1100 °С. Изучались параметры образования фосфатных связующих и свойства железофосфатного бетона на основе H_3PO_4 и отхода сернокислотной промышленности – пиритных огарков.

Результаты. Установлено, что Никольская глина является хорошим сырьем для производства высокопрочного тяжелого керамзитового гравия с прочностью до 550 кг/см², водопоглощением 1,5 % и стойкостью к агрессивным средам, что делает возможным его применение для изготовления бетонов специального назначения. Полученные результаты конкретизируют методы испытаний и технические требования, методы контроля и правила приемки продукции, что позволит повысить качество и долговечность рассматриваемых бетонов.

Выводы. Применение исследуемой невспучивающейся глины возможно с применением органических и железистых добавок для получения высокопрочного керамзитового гравия для изготовления конструктивных бетонов. Получение смешанного железофосфатного связующего позволяет изготовить жаростойкие бетоны для футеровок плавильно-литейных агрегатов цветной металлургии с высокой стойкостью и долговечностью.

Ключевые слова: отходы промышленных производств, легкие бетоны, жаростойкие бетоны, керамзитовый гравий, пиритные огарки, шлаки металлургических производств, футеровка, техногенные отходы, фосфатные связующие, железофосфатные связующие

Для цитирования: Соколова С.В., Сидоренко Ю.В. Получение эффективных материалов на основе отходов сернокислотной промышленности. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):131–147. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-131-147)

Вклад авторов

Соколова С.В. – разработка идеи, общее руководство работой; подготовка, проведение, обработка и анализ экспериментальных исследований; подбор, анализ и перевод иностранных источников, подбор графических материалов, подготовка рукописи статьи и ее окончательная редакция.

Сидоренко Ю.В. – систематизация материалов, оформление текста статьи, подбор, анализ и систематизация литературных источников.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.12.2023

Поступила после рецензирования 15.03.2024

Принята к публикации 28.03.2024

PRODUCTION OF EFFECTIVE MATERIALS ON THE BASIS OF SULFURIC ACID INDUSTRY WASTES

S.V. SOKOLOVA^{1,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

Yu.V. SIDORENKO², Cand. Sci. (Engineering)

¹ Samara State Transport University, Svobody str., 2B, Samara, 443066, Russian Federation

² Samara State Technical University, Molodogvardeyskaya str, 244, Samara, 443100, Russian Federation

Abstract

Introduction. Solving the urgent problem of the production of special concretes using certain varieties of substandard natural raw materials and a number of industrial wastes will support introducing the principles of resource saving and improving the technological features of production.

Aim. To make a comprehensive assessment of the impact of sulfuric acid production wastes and substandard natural clay raw materials on the production of high-quality and durable concretes for special purposes.

Materials and methods. Easily fusible clay rocks serve as a raw material for the production of expanded clay gravel. Organic (solar oil) and ferruginous (pyrite cinders) additives were used. X-ray analysis was carried out to determine the crystalline phases in the clay of the Nikolskoe oil-field, in the resulting expanded clay gravel, as well as to analyze the factory bulk samples of pyrite cinders. A tubular electric furnace was used for firing in a two-stage mode of 700 and 1100 °C to obtain high-strength expanded clay gravel under laboratory conditions. The research involved studying parameters of phosphate binder formation and properties of iron phosphate concrete based on H_3PO_4 and sulfuric acid industry wastes – pyrite cinders.

Results. It was found that Nikolskoye field clay forms a good raw material for the production of high-strength heavy expanded clay gravel with a strength of up to 550 kg/cm², water absorption of 1.5 % and resistance to aggressive environments, thereby making it suitable for manufacturing special concretes. The results obtained specify the test methods and technical requirements, control methods and product acceptance rules, thus improving the quality and durability of the concretes considered.

Conclusions. The investigated non-bloating clay can be used with organic and ferruginous additives to obtain high-strength expanded clay gravel for the manufacture of structural concretes. A mixed iron phosphate binder serves for producing heat-resistant concretes for linings of melting and casting units in non-ferrous metallurgy with high resistance and durability.

Keywords: industrial wastes, lightweight concretes, heat-resistant concretes, expanded clay gravel, pyrite cinders, slags from metallurgical industries, lining, technogenic wastes, phosphate binders, iron phosphate binders

For citation: Sokolova S.V., Sidorenko Yu.V. Production of effective materials on the basis of sulfuric acid industry wastes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):131–147. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-131-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-131-147)

Authors contribution statement

Sokolova S.V. – concept statement, general supervision; experimental data processing and analysis; selection, translation and analysis of foreign literature sources, selection of graphical materials, drafting the manuscript and preparing its final version.

Sidorenko Yu.V. – systematization of materials, contribution to the scientific layout, selection, analysis and systematization of literature sources.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.12.2023

Revised 15.03.2024

Accepted 28.03.2024

Введение

Главное направление оптимизации в технологии современного строительного комплекса – это возможность применить эффективные строительные материалы, снизить материалоемкость, повысить механизацию и индустриализацию строительства. Также важным вопросом является улучшение эксплуатационных характеристик изделий, внедрение безотходных технологий в производство, что создает благоприятные условия для сохранения природной среды и экологических систем от промышленных загрязнений.

В Самарской области функционируют карьеры по добыче нерудных сырьевых материалов (известняки, доломиты, гипсовый камень, глинистое сырье, песчано-гравийная смесь и др.), развиты нефтегазодобывающая промышленность, машиностроительные, химические и нефтехимические производства, заводы строительных материалов, цветная металлургия и др. Большое число этих предприятий являются источниками образования промышленных отходов, которые могут быть отнесены к техногенным образованиям. Такими, в частности, являются пиритные огарки – отходы сернокислотной промышленности [1–10]. Это темно-бурый тонкомолотый порошок, который по химическому составу можно отнести к высокожелезистому полиминеральному материалу, образующемуся на предприятиях по производству серной кислоты. Во время функционирования Чапаевского химзавода по производству серной кислоты было накоплено большое количество рыхлых железосодержащих отходов. Для получения серного ангидрита сжигается пирит FeS_2 , в результате чего образуются пиритные огарки: $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$.

Таким образом, в составе пиритных огарков наблюдается преобладание железосодержащих соединений в виде оксидов Fe_2O_3 и FeO , а также гидроксидов $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Fe}(\text{OH})_2$.

Поэтому одним из перспективных направлений в производстве современных строительных материалов является применение в виде тонкомолотой добавки пиритных огарков [11–20].

Цель

Исследования отходов промышленных производств сернокислотной промышленности (пиритных огарков) в качестве добавки проводились с целью:

- получения высокопрочного тяжелого керамзитового гравия, обладающего следующими свойствами: насыпная плотность – 1300–1600 кг/м³, прочность на сжатие – 400–600 кг/см², водопоглощение – 1–2 %;
- синтеза железосиликатного связующего для изготовления жаростойких бетонов.

Материалы

Проведены исследования глины Никольского месторождения Самарской области. Глинистые породы являются механической смесью различных глиноземистых материалов и сопутствующих примесей.

Сырьем для производства керамзитового гравия служат легкоплавкие глинистые породы, обладающие способностью при быстром обжиге вспучиваться в природном виде и с добавками, образующие материалы ячеистой структуры.

Исследуемая глина Никольского месторождения, расположенного около с. Никольское в 6,5 км от железнодорожной станции Безенчук Самарской области, практически не вспучивается и не может быть рекомендована для производства керамзитового гравия во вращающихся печах.

Поэтому были применены добавки органические и железистые.

Исследована вспучиваемость глины, в состав которой одновременно введены органические примеси и оксиды железа: в качестве органических добавок применяли опилки, сульфито-спиртовую барду, опилки, соляровое масло; в качестве железистых добавок были применены пиритные огарки [1]. В их состав входят растворимые в воде соли, главным образом сульфат кальция и хлориды щелочных металлов. Основной составной частью пиритных огарков являются оксиды железа и кремния.

Гранулометрический состав пиритных огарков представлен в табл. 1.

В табл. 2 приводятся данные химического анализа валовых проб пиритных огарков.

Методы и результаты

Разработка состава керамзитобетона с применением отходов сернокислотной промышленности для получения бетонов водохозяйственного назначения

Важнейшее значение минералогического состава состоит в том, что он предопределяет сложный физико-механический процесс структурообразования керамзита, включая фазовые превращения на основных стадиях термообработки, ряд компонентов которого участвует непосредственно или во взаимодействии в образовании пористой структуры с выделением газо-парообразной фазы, без чего невозможно парообразование и вспучивание. Для определения кристаллических фаз, содержащихся в глине Никольского месторождения, проводился рентгеновский анализ (рис. 1) [2].

Анализ рентгенограммы позволяет сделать вывод, что в глине первичные минералы представлены кварцем (КВ), кальцитом (CaCO₃), полевыми шпатами (пол. шп.), а вторичные – монтмориллонитом.

Таблица 1

Гранулометрический состав пиритных огарков

Table 1

Granulometric composition of pyrite cinders

Вид огарка	Остаток на ситах, %						Проход, %, через сито 0,08
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	0,08	
Чапаевские (сухие)	3,7	2,9	4,5	13	33	34	11

Таблица 2

Химический состав пиритных огарков (валовые пробы)

Table 2

Chemical composition of pyrite cinders (gross samples)

Наименование пробы	П.П.П.	Состав, %							
		SiO ₂	Fe ₂ O ₃	FeO	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SO ₃	Сумма
Чапаевский химзавод	2,07	22,37	63,11	4,94	0,57	0,71	3,3	3,07	100,15

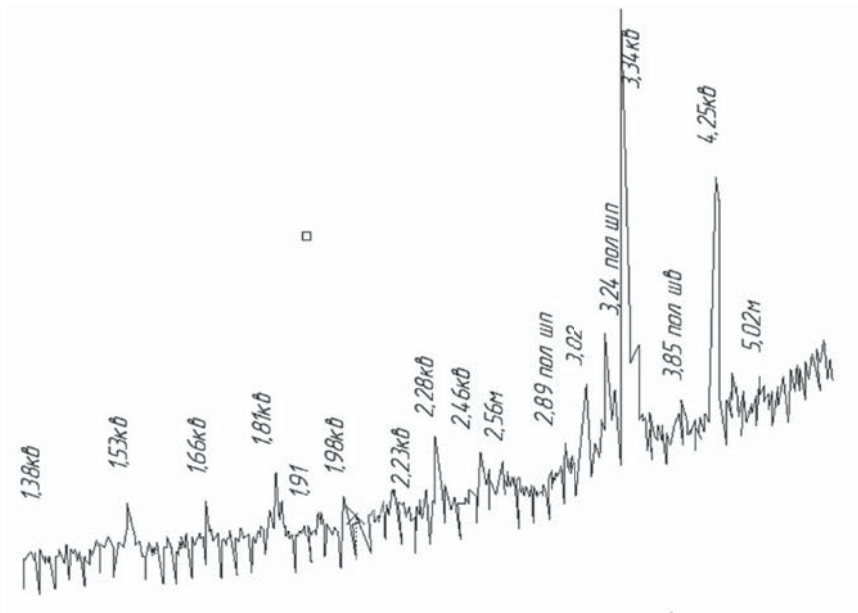


Рис. 1. Рентгенограмма глины Никольского месторождения (Безенчукский район Самарской области)
Fig. 1. X-ray image of clay from the Nikolskoye field (Bezenchuksky District, Samara Oblast)

Испытания Никольской глины без добавок на вспучиваемость при различных температурных режимах не дали положительных результатов. Поэтому были применены органические и железистые добавки (рис. 2) [3].

Из органических добавок самым эффективным оказалось соляровое масло в количестве 1,5%. При этом получен керамзитовый гравий со следующими характеристиками:

- коэффициент вспучивания – 2,3;

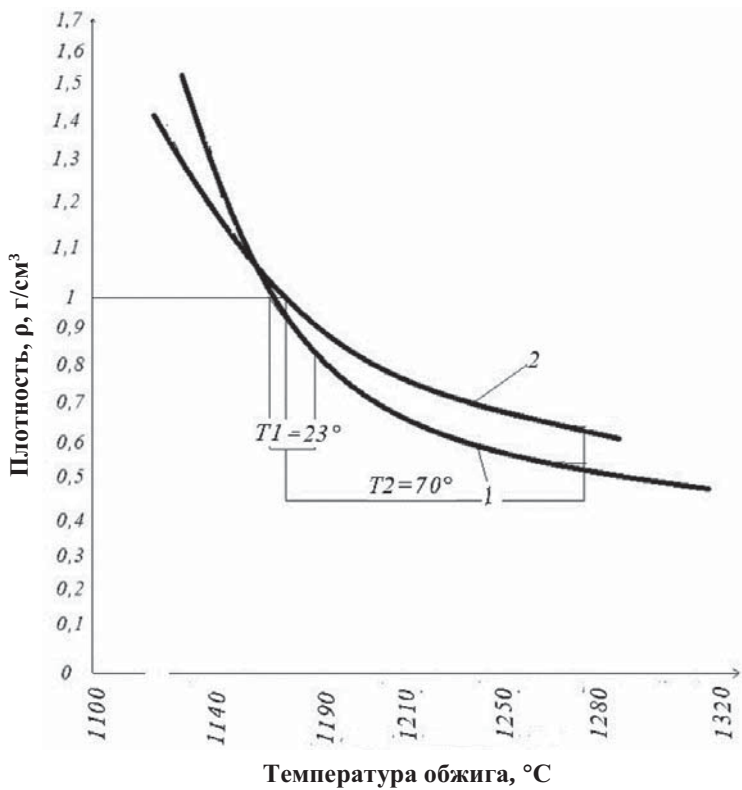


Рис. 2. Вспучиваемость Никольской глины:

1 – глина с добавкой 1,5% солярового масла; 2 – глина с добавкой 1,5% солярового масла и 1% пиритных огарков

Fig. 2. Bloating of Nikolskoye field clay:

1 – clay with 1.5% solar oil additive; 2 – clay with 1.5% solar oil and 1% pyrite cinder additives

- плотность в куске – 0,9 г/см³;
- насыпная плотность – 440 кг/м³;
- прочность гравия на скалывания – 6,3 кг/см²;
- водопоглощение – 12 %;
- интервал вспучивания – 20 °С.

Положительный результат получили при комбинировании органических и железистых добавок: 1,5% солярового масла и 1% пиритных огарков. Был получен керамзитовый гравий со следующими характеристиками:

- коэффициент вспучивания – 2,2;
- плотность в куске – 0,8 г/см³;
- насыпная плотность – 440 кг/м³;
- прочность гравия на скалывания – 6,5 кг/см²;
- водопоглощение – 12 %;
- интервал вспучивания – 70 °С.

Гранулы формовались из глиняной массы с рабочей влажностью 18–20%.

Сушка гранул производилась в термостате при температуре 105–110 °С до постоянного веса.

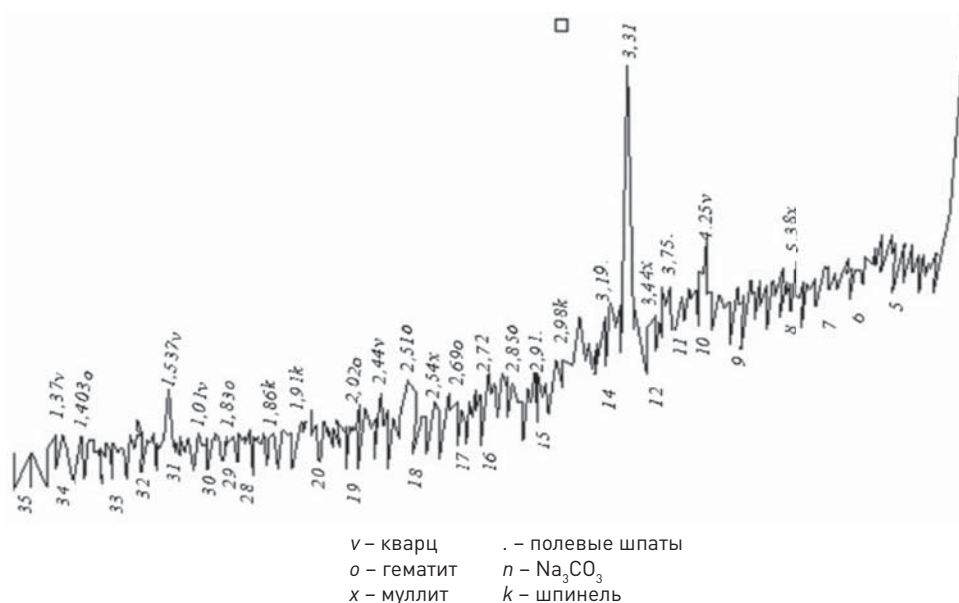


Рис. 3. Рентгенограмма тяжелого керамзитового гравия
Fig. 3. X-ray image of heavy expanded clay gravel

Обжиг высушенных гранул осуществлялся в трубчатой электрической печи по двухступенчатому режиму. Сначала гранулы нагревали до температуры 700 °С, при которой делали термостатическую выдержку в течение 10 минут. Затем гранулы 20 минут выдерживали при температуре 1100 °С и после этого охлаждали.

Рентгенографический анализ керамзита (рис. 3) дал возможность установить, что в керамзите присутствуют кристаллы кварца, гематита, муллита, шпинели, полевых шпатов.

В лабораторных условиях был получен высокопрочный керамзитовый гравий [4].

Испытание гранул на прочность производилось на образцах-кубиках размером 20 × 20 × 20 мм с помощью гидравлического пресса мощностью 10 тонн.

Образцы обжигались по вышеприведенному режиму.

Был получен керамзитовый гравий с коэффициентом вспучивания до 2,2; плотность в куске при этом – 0,8 г/см³.

Интервал вспучивания глины с данной добавкой оказался равным 70 °С.

Гравий был получен при следующих режимах термообработки: температура предварительной термоподготовки – 300 °С; время термоподготовки – 20 мин; температура обжига – 1220 °С; время обжига – 10 мин.

На основе полученного керамзитового гравия был разработан состав керамзитобетона, представленный в табл. 3.

Таблица 3

Состав керамзитобетона

Table 3

Composition of expanded clay concrete

№ п/п	Наименование материалов	Расход материалов на 1 м ³ керамзитобетона, кг
1	Портландцемент М 400	281
2	Керамзитовый гравий	281
3	Кварцевый песок	563
4	Вода	132

Разработка состава жаростойкого бетона с применением отходов сернокислотной промышленности для ремонта тепловых агрегатов

Одной из важных задач является изготовление бетонов и растворов, обладающих повышенными физико-термическими свойствами для футеровок тепловых агрегатов, работающих в сложных эксплуатационных условиях (повышенная температура, агрессивная среда, контакт материала футеровки с газами, с расплавами металлов, расплавами флюсов).

Как известно, футеровка промышленных печей и других тепловых агрегатов выполняется главным образом из различных штучных огнеупорных керамических изделий, что требует больших затрат физического труда и не обеспечивает высокого качества.

Компоненты жаростойких бетонов, а именно тонкомолотые добавки и заполнители, обычно изготавливают из дефицитных и дорогостоящих материалов (шамота, муллита, хромита, магнезита, циркона и т. д.). Кроме того, для изготовления отдельных видов добавок требуется выполнение энергозатратных операций по помолу и рассеву, что усложняет и удорожает технологию производства жаростойких бетонов на их основе. Поэтому замена дефицитных и дорогих компонентов жаростойких бетонов, а именно заполнителей и тонкомолотых добавок, местными материалами является важной народно-хозяйственной задачей.

Расширение промышленного производства связано с образованием многотоннажных отходов, которые необходимо складировать, что создает значительные трудности для народного хозяйства. На полигонах и в отвалах под воздействием атмосферных агентов отходы разлагаются, а продукты разложения наносят большой ущерб растительности и водоемам вблизи мест складирования. Решение вопросов по проблеме утилизации отходов способствует снижению стоимости строительных материалов и освобождает сельскохозяйственные угодья за счет ликвидации шлако- и шламоотвалов.

В последнее время при изготовлении и ремонте футеровок тепловых агрегатов широко используются жаростойкие бетоны на фосфатных связующих [5].

Изучались параметры образования фосфатных связующих и свойства железифосфатного бетона на основе H_3PO_4 и отхода сернокислотной промышленности – пиритных огарков Чапаевского завода [6].

Был проведен рентгеноструктурный анализ заводских валовых проб данного отхода (рис. 4).

В результате данного анализа в пробах пиритных огарков были обнаружены гематит и кварц.

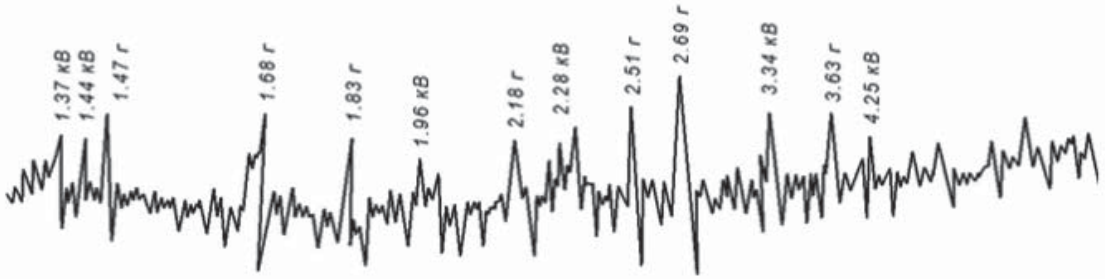


Рис. 4. Рентгенограмма валовых проб пиритных огарков Чапаевского химзавода
 Fig. 4. X-ray image of bulk samples of pyrite cinders from the Chapaevsk Chemical Plant

В г. Самаре (бывшем г. Куйбышеве) с 50-х годов XX века функционирует одно из крупнейших предприятий металлургии – Самарский металлургический завод, специализирующийся на выпуске легких алюминиевых сплавов, применяемых в дальнейшем в виде изделий в авиационной промышленности. В процессе получения алюминиевого сплава в технологии высокотемпературного плавления в пламенных отражательных печах обязательно применяются флюсы. К флюсам относятся криолит – $\text{Na}_3[\text{AlF}_6]$, карналлит – $\text{KCl} \cdot \text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$, сильвинит – $\text{NaCl} \cdot \text{KCl}$ и другие химические соединения, содержащие фториды, хлориды. Количество добавляемых флюсов иногда составляет 30 %. В результате такого состава в процессе плавки на поверхности ванн печей образуется огромное количество такого техногенного продукта, как солевой алюминиевый шлак. Пылевидная фракция шлака с размером менее 0,14 мм не пригодна для переплавки и отправляется на полигон для захоронения. Весьма эффективным оказалось применение высокоогнеупорного продукта обжига солевого шлака в связующем, полученном на основе многотоннажного железосодержащего отхода сернокислого производства – пиритных огарков. Для получения смешанного алюможелезофосфатного связующего в качестве глиноземсодержащего компонента можно использовать технические продукты, такие как высокоглиноземистый технический глинозем, тонкодисперсный корунд и другие, а также отходы промышленности, например алюмохромистый отработанный катализатор нефтехимии ИМ-2201, обожженный солевой шлак, содержащий до 95 % Al_2O_3 , и отходы сернокислотной промышленности – пиритные огарки. При введении обожженного солевого шлака в композицию пиритных огарков с ортофосфорной кислотой образуется смешанное вяжущее. Некоторые составы жаростойких бетонов с применением связующих на основе ортофосфорной кислоты и отходов промышленных производств – пиритных огарков и обожженного солевого шлака – представлены в табл. 4 [7].

Применение для футеровки жаростойкого бетона фосфатного твердения позволяет получить бесшовную гладкую поверхность стенок горелок и других ответственных деталей. Часть футеровки пламенных плавильных печей Самарского металлургического завода была выполнена с применением жаростойкого бетона на фосфатном связующем и шамотного заполнителя.

Горелочный блок (рис. 5) представляет собой прямоугольную конструкцию с коническим отверстием. Горелочные камни могут иметь размеры от 600 × 600 мм в плане до 1100 × 1100 мм. В зависимости от объема агрегата наклонная подина печи имеет

Таблица 4

Физико-термические параметры жаростойких бетонов фосфатного твердения, полученных на основе обожженного солевого шлака и пиритных огарков

Table 4

Physical and thermal parameters of heat-resistant phosphate-bonded concrete, obtained on the basis of burnt salt slag and pyrite cinders

Состав бетона, кг/м³	Средняя плотность в сухом состоянии, кг/м³	Предел прочности при сжатии, МПа, после твердения до температуры, °С					Термостойкость, водные теплосмены	Класс бетона
		20 (суток)	500	800	1200	1400		
Пиритные огарки – 95; Обожженный солевой шлак – 355; Шамотный щебень – 755; Шамотный песок – 655; Н ₃ РO ₄ (70%-ной концентрации) – 280	2015	4,6	43,2	45,4	46,3	45,2	30	И 12
Пиритные огарки – 95; Обожженный солевой шлак – 355; Высокоглиноземистый щебень – 785; Высокоглиноземистый песок – 685; Н ₃ РO ₄ (70%-ной концентрации) – 280	2105	5,8	44,7	49,3	50,6	51,4	35	И 12

следующие размеры: длина 3600, ширина до 4400 мм. На задней стене имеется окно размером 300 × 535 мм, карман для слива расплава сифонным методом. Карман перекрывается блоком из жаростойкого бетона фосфатного твердения. Толщина рабочей футеровки стен печи 230 мм. Вся конструкция заключена в металлический кожух. Температура в печи во время ее работы составляет 1000–1300 °С, при которой расплавы и флюсы проникают в швы и разрушают футеровку.

Жаростойкие бетоны на смешанных алюможелезофосфатных (АЖФС) и цирконо-железофосфатных (ЦЖФС) связующих со средней плотностью 2200–2300 кг/м³ были испытаны в виде монолитных и сборных элементов футеровок плавильных печей и миксеров для плавки алюминия и его сплавов при температуре на поверхности футеровки до 1300 °С.

Приготовление бетонной смеси осуществлялось на отдельном бетонном участке на Самарском металлургическом заводе по следующим этапам: в ковш скипового подъемника бетономешалки принудительного действия СБ-80 загружались все сухие материалы: пиритные огарки, высокоглиноземистый мертель МЛС-1, циркон, заполнители. После перемешивания сухих компонентов в течение 1 минуты в смесь заливали 70 %-ный раствор ортофосфорной кислоты, заранее приготовленный в специальной емкости. Затем смесь перемешивалась до полной однородности в течение 5 минут. Из бетономешалки

смесь выгружалась в раздаточный бункер и загружалась в формы. После уплотнения смеси на вибростоле бетон в формах выдерживался в воздушных условиях в помещениях цеха при температуре не ниже 20 °С в течение одних суток. Через сутки изделия распалубливались и отправлялись на место монтажа футеровки плавильных печей. Сушка бетонных блоков осуществлялась в смонтированной футеровке при первом разогреве теплового агрегата по графику металлургического завода вывода печи на рабочий режим. Для использования монолитного бетона в футеровках печей устанавливались опалубки, в которые и укладывалась бетонная смесь. Для уплотнения применялись глубинные вибраторы или пневмотрамбовки.

В последующих опытно-промышленных экспериментах такие дорогостоящие и дефицитные технические продукты, как высокоглиноземистый мертель и циркон, были заменены на местные промышленные отходы. Например, отработанный катализатор ИМ-2201 с Новокуйбышевского нефтехимкомбината, имеющий огнеупорность более 2000 °С, обеспечил полноценную замену не только высокоглиноземистому мертелю МЛМ-62, но и цирконовому концентрату КЦ-1.

В футеровке плавильно-литейных агрегатов из монолитного бетона были выполнены карманы печей. Из сборных бетонных изделий были испытаны: блоки перекрытия кармана печей, горелочные блоки, термopарные блоки, плиты перекрытия кармана миксера, направляющий блок шибера газохода, блоки откоса и подины (рис. 6). Наблюдением за работой бетонных изделий, смонтированных в футеровке плавильных печей, установлено, что бетон находится в хорошем состоянии, расплавами металла и шлака не смачивается, отклонений в технологическом процессе выплавки алюминиевых сплавов не наблюдается.

Срок службы футеровки из жаростойкого бетона увеличился более чем в 2 раза по сравнению со штучными огнеупорами. На рис. 5 представлены снимки горелок, выполненных из шамотного огнеупора и жаростойкого бетона на АЖФС. После шестимесячной работы горелки, выполненные из шамотного огнеупора, практически полностью заросли шлаком, что привело к остановке печи (рис. 5а).

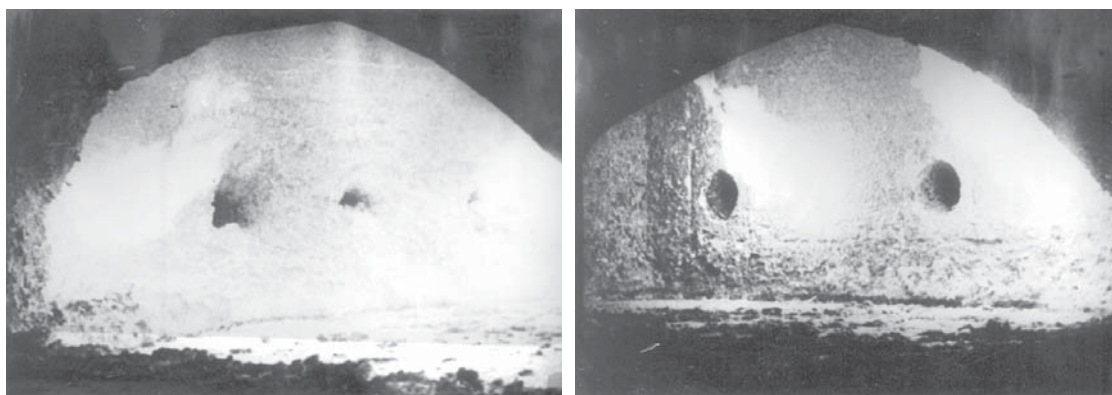
Горелочные блоки, выполненные из жаростойкого бетона на основе АЖФС и проработавшие в печи в течение двух лет, находятся в удовлетворительном состоянии и пригодны к дальнейшей эксплуатации (рис. 5б).

Для блоков футеровок плавильно-литейного оборудования применялись составы, разработанные в лабораторных условиях:

- а) для плавильной печи, работающей при $t = 1100$ °С:
 - пиритные огарки Чапаевского химзавода – 225 кг/м³;
 - высокоглиноземистый мертель МЛС-1 – 225 кг/м³;
 - шамотный щебень – 755 кг/м³;
 - шамотный песок – 655 кг/м³;
 - ортофосфорная кислота 70%-ной концентрации – 260 кг/м³.

В наиболее ответственных конструкциях (термopарных блоках, блоках перекрытия осадительных камер) был применен состав без мертеля [9], но с использованием алюмохромистого отработанного катализатора ИМ-2201.

- б) для материалов, эксплуатируемых при $t > 1300$ °С:
 - пиритные огарки Чапаевского химзавода – 225 кг/м³;



а (a) **б (b)**
Рис. 5. Блоки горелок, изготовленные из шамотных огнеупоров и жаростойкого бетона на АЖФС: а – блоки горелок из шамотного огнеупора после шести месяцев работы; б – блоки горелок из жаростойкого материала после двух лет работы

Fig. 5. Burner blocks made of fireclay refractories and heat-resistant alumina-iron-phosphate concrete: а – burner blocks made of fireclay refractories after six months of operation; б – burner blocks made of heat-resistant material after two years of operation

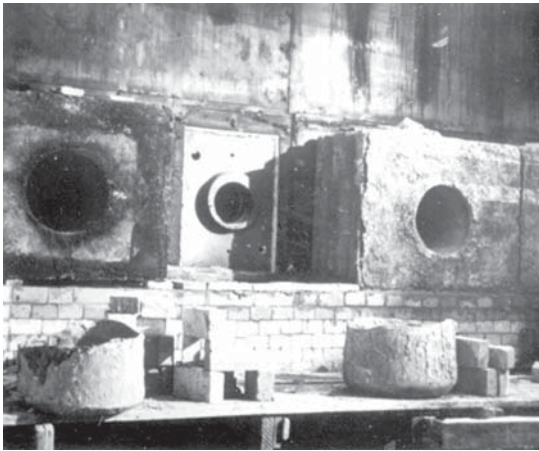
- цирконовый концентрат КЦ-1 – 225 кг/м^3 ;
- высокоглиноземистый щебень МЛС-62 – 755 кг/м^3 ;
- высокоглиноземистый песок МЛС-62 – 655 кг/м^3 ;
- ортофосфорная кислота 70%-ной концентрации – 260 кг/м^3 .

Было установлено хорошее состояние бетона, несмачиваемость расплавом металлов и шлаков. Отклонений в технологических процессах выплавки алюминиевых сплавов не наблюдалось [10].

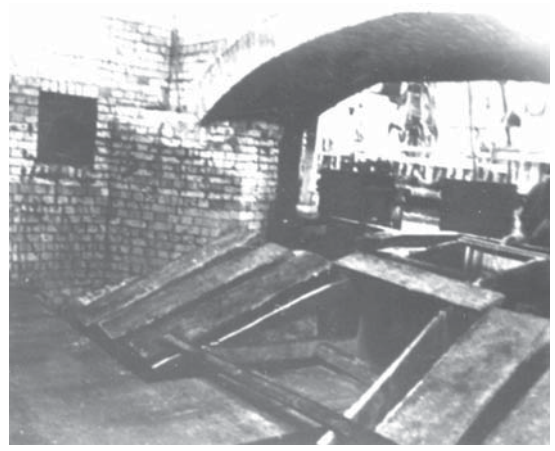
Таким образом, производственное испытание жаростойкого бетона на АЖФС в футеровке плавильно-литейного агрегата цветной металлургии показало высокую стойкость и долговечность в сравнении со штучными огнеупорами [11].

Выводы

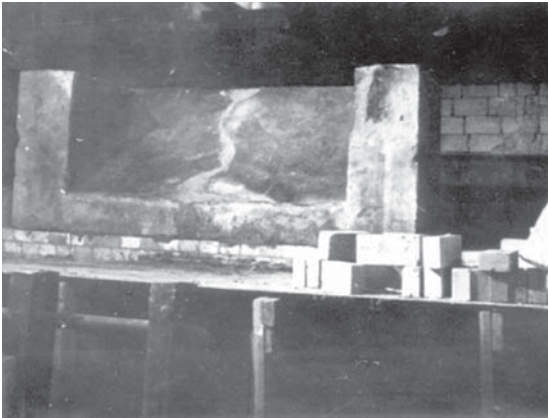
1. При исследовании возможности применения глин Никольского месторождения Безенчукского района Самарской области для получения керамзитового гравия можно сделать следующие выводы: определение на вспучиваемость в природном виде показало, что данная глина относится к невспучивающимся, поэтому были применены добавки (органические и железистые). Применение смеси органических и железистых добавок (пиритные огарки) позволяет увеличить интервал вспучивания до 70°C . Был получен керамзитовый гравий с коэффициентом вспучивания 2,2 и плотностью $0,8 \text{ г/см}^3$. Никольскую глину можно использовать для получения высокопрочного керамзитового гравия. В лабораторных условиях был получен гравий с прочностью на сжатие до 550 кг/см^2 , насыпной плотностью $1100\text{--}1200 \text{ кг/м}^3$, плотностью в куске $2100\text{--}2200 \text{ кг/м}^3$, водопоглощением 1,5%. Высокопрочный тяжелый керамзитовый гравий рекомендуется использовать для получения конструктивных бетонов водохозяйственного назначения.



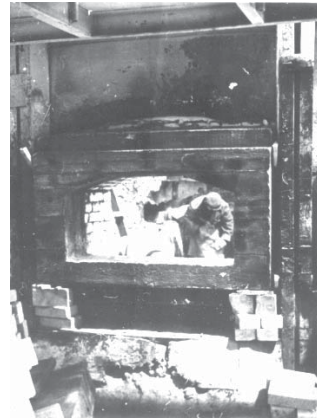
а (a)



б (b)



в (c)



г (d)

Рис. 6. Монтаж элементов плавильных печей, изготовленных из жаростойкого бетона: а – монтаж горелочного блока; б – монтаж плиты подины печи; в – направляющий блок шиберга газохода; г – монтаж фронтальной плиты

Fig. 6. Installation of melting furnace elements made of heat-resistant concrete: а – installation of the burner assembly; б – installation of the furnace bottom plate; в – guide block of the flue damper; г – installation of the front plate

2. Многие технологические процессы металлургии и машиностроения, такие как получение металлов, их переплавка, термообработка металлических деталей и другие, осуществляются обычно при высоких температурах в промышленных печах с воздушной окислительной атмосферой. Эти процессы сопровождаются образованием жидких металлов и шлаков. Части футеровок тепловых агрегатов, которые нагреваются под действием высоких температур и контактируют с газами, жидкими металлами и шлаками, должны быть не только прочными, но и весьма устойчивыми к действию всех этих факторов. На территории Чапаевского химзавода накопилось множество тонн рыхлого железосодержащего отхода. Пиритные огарки образуются при сжигании пирита FeS_2 для получения серного ангидрида по реакции: $4\text{FeS}_2 + 11\text{O}_2 \xrightarrow{t} 2\text{Fe}_2\text{O}_3 + 8\text{SO}_2$. Поэтому в химическом составе пиритных огарков преобладают железосодержащие соединения в виде оксидов Fe_2O_3 , FeO

и гидроксидов $\text{Fe}(\text{OH})_3$ и $\text{Fe}(\text{OH})_2$. Их общее содержание не превышает 70–75 %. Поэтому наиболее перспективным направлением является их применение в виде тонкомолотой огнеупорной добавки в процессах синтеза воздушно-твердеющих жаростойких фосфатных связующих. Весьма эффективным оказалось применение высокоогнеупорного продукта обжига солевого шлака в связующем, полученном на основе многотоннажного железосодержащего отхода сернокислого производства – пиритных огарков. На основе пиритных огарков были разработаны составы жаростойких композитов с целью ремонта промышленных тепловых агрегатов, которые показали хорошие физико-механические характеристики.

3. Исследования показали, что промышленные отходы в большинстве своем являются ценным сырьем, которое можно применить для изготовления различных строительных материалов. Некоторые отходы промышленности можно использовать в качестве сырья для изготовления специальных строительных материалов. На территории Самарской области функционирует не один десяток карьеров по добыче нерудных сырьевых материалов (известняков, доломитов, гипсового камня, глинистого сырья, песчано-гравийной смеси и других). В области сильно развита нефтегазодобывающая деятельность для снабжения местной промышленности и энергетического комплекса топливом. В результате наличия местных сырьевых ресурсов в Самарской области большое развитие получили машиностроение, химия и нефтехимия, строительство и промышленность строительных материалов, цветная металлургия и другие отрасли промышленности. Большинство предприятий этих отраслей являются источниками образования отходов.

Значительная часть отходов может быть отнесена к техногенным образованиям, переработка которых позволяет в ряде случаев одновременно решить экологические проблемы, увеличить объемы вторичных ресурсов, решить проблемы занятости населения.

Список литературы

1. Федоров В.П., Хлыстов А.И. Высокопрочный керамический заполнитель для бетонов водохозяйственного строительства. В: Якубовский Б.В. (ред.). Эффективность применения легких бетонов в строительстве: тезисы докладов и сообщений на Куйбышевской областной научно-практической конференции. Куйбышев: Куйбышевский инженерно-строительный ин-т им. А.И. Микояна; 1973.
2. Федоров В.П., Хлыстов А.И. Керамический тяжелый заполнитель для бетонов водохозяйственного строительства. Известия ВУЗов. Строительство и архитектура. 1974;(2):80.
3. Федоров В.П., Хлыстов А.И. Высокопрочный керамический гравий для бетонов. В: Сб. трудов Саратовского политехнического института. Саратов: Саратовский политехнический ин-т; 1974.
4. Федоров В.П., Хлыстов А.И. Композиция для изготовления керамического заполнителя бетона: а.с. 726057 СССР. Оpubл. 05.04.1980.
5. Хлыстов А.И., Соколова С.В. Термодинамический принцип оценки пригодности техногенного сырья для синтеза фосфатных связующих. Башкирский химический журнал. 2004;(2):27.
6. Хлыстов А.И., Соколова С.В., Баранова М.Н., Коннов М.В., Широков В.А. Совершенствование технологии применения футеровочных пропиточно-обмазочных составов и структурно-химической модификации алюмосиликатных и высокоглиноземистых огнеупоров. Огнеупоры и техническая керамика. 2015;(10):48–55.
7. Хлыстов А.И., Соколова С.В., Широков В.А., Чернова Е.А., Власова Е.М. Использование отходов металлургии алюминиевых сплавов в составах жаростойких материалов фосфатного твердения. Огнеупоры и техническая керамика. 2016;(9):44–52.

8. *Khlystov A.I., Shirokov V.A., Sokolova S.V.* Improvement of technological processes of production and application of liquid phosphate binders. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;775(1):012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/775/1/012114>
9. *Хлыстов А.И., Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А.* Перспективы использования глиноземсодержащих отходов промышленности в производстве жаростойких бетонов. Экология и промышленность России. 2021;25(7):13–19. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-7-13-19>
10. *Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А.* Перспективы применения промышленных отходов для повышения долговечности и огнеупорности жаростойких бетонов. Строительство и реконструкция. 2023;(2):123–133. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133>
11. *Соколова С.В., Баранова М.Н., Васильева Д.И., Холопов Ю.А.* Вторичное использование глиноземсодержащих отходов промышленности для синтеза жаростойких бетонов. Строительные материалы. 2023;(4):20–23. <https://doi.org/10.31659/0585-430x-2023-812-4-20-23>
12. ГОСТ 32026-2012. Сырье глинистое для производства керамзитового гравия, щебня и песка. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2014.
13. *Роговой М.И.* Технология искусственных пористых заполнителей и керамики. Москва: Эколит; 2016.
14. *Alp I., Deveci H., Yazici E.Y., Türk T., Süngün Y.H.* Potential use of pyrite cinders as raw material in cement production: Results of industrial scale trial operations. Journal of Hazardous Materials. 2009;166(1):144–149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.129>
15. *Abikak E.B., Kenzhaliyev B.K.* Development of an integrated technology intended to process pyrite cinders using Chemical pre-activation. NEWS Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan. Ser. Geol. Tech. Sci. 2022;(3):32–51. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170x.178>
16. *Estokova A., Smolakova M.* Investigation of concrete made with various wastes subjected to sulfuric acid attack. Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS. 2018;17:24–30. <https://doi.org/10.13167/2018.17.3>
17. *Sandanayake M., Bouras Y., Haigh R., Vrcelj Z.* Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete – A Decade Review. Sustainability. 2020;12(22):9622. <https://doi.org/10.3390/su12229622>
18. *Deryagin V.B., Sapelkin V.S., Frolov V.P., Sergeeva A.V.* Heat-resistant thermally insulating concretes with phosphate and aluminate binders. Refractories and Industrial Ceramics. 2011;52(4):243–246. <https://doi.org/10.1007/s11148-011-9406-x>
19. *Abyzov V.A.* Refractory cellular concrete based on phosphate binder from waste of production and recycling of aluminum. Procedia Engineering. 2017;206:783–789. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.551>
20. *Abyzov V.A.* Lightweight Refractory Concrete Based on Aluminum-Magnesium-Phosphate Binder. Procedia Engineering. 2016;150:1440–1445. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.077>

References

1. *Fedorov V.P., Khlystov A.I.* High-strength ceramic filler for concretes of water management construction. In: Yakubovsky B.V. (ed.). Efficiency of application of light concretes in construction: abstracts of reports and communications at the Kuibyshev regional scientific and practical conference. Kuibyshev: Kuibyshev Institute of Civil Engineering named after A.I. Mikoyan; 1973. (In Russian).
2. *Fedorov V.P., Khlystov A.I.* Ceramic heavy filler for concretes of water management construction. Izvestiya VUZov. Stroitel'stvo i arkhitektura = Izvestiya VUZov. Construction and architecture. 1974;(2):80. (In Russian).
3. *Fedorov V.P., Khlystov A.I.* High-strength ceramic gravel for concrete. In: Collection of proceedings of the Saratov Polytechnic Institute. Saratov: Saratov Polytechnic Institute; 1974. (In Russian).
4. *Fedorov V.P., Khlystov A.I.* Composition for the production of ceramic concrete aggregate. Patent USSR no 726057. Publ. Date 05 April 1980. (In Russian).
5. *Khlystov A.I., Sokolova S.V.* Thermodynamic principle of assessing the suitability of technogenic raw materials for the synthesis of phosphate binders. Bashkir Chemical Journal. 2004;(2):27. (In Russian).
6. *Khlystov A.I., Sokolova S.V., Baranova M.N., Konnov M.V., Shirokov V.A.* Improvement of the technology of application of lining impregnating and coating compositions and structural and chemical modification

- of aluminosilicate and high-alumina refractories. *Refractories and technical ceramics*. 2015;(10):48–55. [In Russian].
7. *Khlystov A.I., Sokolova S.V., Shirokov V.A., Chernova E.A., Vlasova E.M.* The use of waste metallurgy of aluminum alloys in compositions of heat-resistant phosphate hardening materials. *Refractories and technical ceramics*. 2016;(9):44–52. [In Russian].
8. *Khlystov A.I., Shirokov V.A., Sokolova S.V.* Improvement of technological processes of production and application of liquid phosphate binders. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020;775(1):012114. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/775/1/012114>
9. *Khlystov A.I., Sokolova S.V., Baranova M.N., Vasilyeva D.I., Kholopov Yu.A.* Prospects for Using Alumina-Containing Industrial Waste in Cement Production. *Ecology and industry of Russia*. 2021;25(7):13–19. [In Russian]. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2021-7-13-19>
10. *Sokolova S.V., Baranova M.N., Vasilyeva D.I., Kholopov Yu.A.* Possibilities of using industrial waste to improve heat resistant concrete durability and refractoriness. *Building and Reconstruction*. 2023;(2):123–133. [In Russian]. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-106-2-123-133>
11. *Sokolova S.V., Baranova M.N., Vasilyeva D.I., Kholopov Yu.A.* Recycling of alumina-containing industrial waste for the synthesis of heat-resistant concrete. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2023;(4):20–23. [In Russian]. <https://doi.org/10.31659/0585-430x-2023-812-4-20-23>
12. State Standard 32026-2012. Clay raw materials for manufacturing of clayite gravel, rubble and sand. Specifications. Moscow: Standardinform Publ., 2014. [In Russian].
13. *Rogovoy M.I.* Technology of artificial porous aggregates and ceramics. Moscow: Ekolit Publ.; 2016. [In Russian].
14. *Alp I., Deveci H., Yazıcı E.Y., Türk T., Süngün Y.H.* Potential use of pyrite cinders as raw material in cement production: Results of industrial scale trial operations. *Journal of Hazardous Materials*. 2009;166(1):144–149. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.10.129>
15. *Abikak E.B., Kenzhaliyev B.K.* Development of an integrated technology intended to process pyrite cinders using Chemical pre-activation. *NEWS Natl. Acad. Sci. Repub. Kazakhstan. Ser. Geol. Tech. Sci.* 2022;(3):32–51. <https://doi.org/10.32014/2022.2518-170x.178>
16. *Estokova A., Smolakova M.* Investigation of concrete made with various wastes subjected to sulfuric acid attack. *Electronic Journal of the Faculty of Civil Engineering Osijek-e-GFOS*. 2018;17:24–30. <https://doi.org/10.13167/2018.17.3>
17. *Sandanayake M., Bouras Y., Haigh R., Vrcelj Z.* Current Sustainable Trends of Using Waste Materials in Concrete – A Decade Review. *Sustainability*. 2020;12(22):9622. <https://doi.org/10.3390/su12229622>
18. *Deryagin V.B., Sapelkin V.S., Frolov V.P., Sergeeva A.V.* Heat-resistant thermally insulating concretes with phosphate and aluminate binders. *Refractories and Industrial Ceramics*. 2011;52(4):243–246. <https://doi.org/10.1007/s11148-011-9406-x>
19. *Abyzov V.A.* Refractory cellular concrete based on phosphate binder from waste of production and recycling of aluminum. *Procedia Engineering*. 2017;206:783–789. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.551>
20. *Abyzov V.A.* Lightweight Refractory Concrete Based on Aluminum-Magnesium-Phosphate Binder. *Procedia Engineering*. 2016;150:1440–1445. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.07.077>

Информация об авторах / Information about the authors

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

тел.: +7 (927) 607-94-39

Svetlana V. Sokolova , Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Railway Track and Construction Department, Samara State Transport University, Samara
e-mail: sokolova9967@mail.ru

tel.: +7 (927) 607-94-39

Юлия Викторовна Сидоренко, канд. техн. наук, доцент кафедры «Производство строительных материалов, изделий и конструкций», ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», Самара
e-mail: sm-samgasa@mail.ru

Yulia V. Sidorenko, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Building Materials, Products and Structures Production Department, Samara State Technical University, Samara
e-mail: sm-samgasa@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 69.05

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-148-157](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-148-157)

EDN: ZCOBGS

ЦИФРОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДИСТАНЦИОННОГО УПРАВЛЕНИЯ И КОНТРОЛЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ РАБОТ

Д.М. ЛОСЕВ

Тюменский индустриальный университет, ул. Луначарского, д. 2, г. Тюмень, 625001, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Строительная отрасль в Российской Федерации имеет хороший потенциал к цифровизации. Несмотря на многие неблагоприятные факторы, значительное число наиболее прогрессивных строительных компаний внедряет в свою работу новые технологии, видя их высокий потенциал и эффективность. Поэтому начавшаяся сейчас на государственном уровне работа по «легализации» технологий информационного моделирования имеет большие шансы на успех. Цифровая трансформация является необходимым шагом для устойчивого развития экономики и строительной отрасли.

Цель: выявить преимущества применения современных цифровых технологий в строительстве с целью их дальнейшего внедрения в строительный процесс для автоматизации рутинных процессов и минимизации ошибок.

Материалы и методы. Метаанализ 18 отечественных и зарубежных исследований, имеющих статус публикаций ВАК или SCOPUS, о применении цифровых технологий в строительстве и оценка эффективности изученных технологий.

Результаты. Преимущества беспилотных летательных аппаратов и дронов для картографирования безупречны, как и сложности их использовании в городской среде, особенно в центре городов-миллионников. Основные преимущества использования дрон-технологий в строительстве таковы: получение детализированных данных со строительных площадок и их сравнение с проектной документацией; объективный мониторинг динамики строительства; сокращение количества нарушений правил охраны труда и техники безопасности; улучшение качества мониторинга за объектом, круглосуточный доступ к труднодоступным зонам; оценка объемов выполненных работ; оперативное реагирование на отклонения от проектной документации и своевременное исправление недочетов; совместная работа с BIM (Building Information Model) и цифровой моделью текущего объекта с возможностью экспорта в удобные программы САПР. Основные недостатки использования дрон-технологий в строительстве: максимальное сопротивление ветру 15 м/с; во время дождя или снегопада полученные данные могут быть некорректными; невозможность съемки внутри строящегося объекта именно в автоматическом режиме.

Выводы. Крановая камера Crane Camera Pix4D – самое безопасное решение на сегодня для получения аэрофотоснимков с последующей конвертацией в 2D и 3D.

Ключевые слова: дрон-технологии, цифровые технологии, информационное моделирование, контроль строительства, цифровизация строительства

Для цитирования: Лосев Д.М. Цифровые технологии дистанционного управления и контроля при производстве строительных работ. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;41(2):148–157. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-148-157](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-148-157)

Вклад авторов

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 20.03.2024

Поступила после рецензирования 23.04.2024

Принята к публикации 02.05.2024

DIGITAL TECHNOLOGIES FOR REMOTE CONTROL AND MONITORING OF CONSTRUCTION WORKS

D.M. LOSEV

Industrial University of Tyumen, Lunacharskogo str., 2, Tyumen, 625001, Russian Federation

Abstract

Introduction. The construction industry in the Russian Federation has good potential for digitalization. In spite of numerous unfavorable factors, a significant number of the most progressive construction companies adopt new technologies in their work, recognizing their high potential and effectiveness. Therefore, the legalization of information modeling technologies, which has been initiated at the governmental level, has a great chance of success. Digital transformation constitutes a necessary step for the sustainable development of the economy and construction industry.

Aim. To identify the advantages of using modern digital technologies in construction in order to further implement them in construction projects for automating routine processes and minimizing errors.

Materials and methods. The study provides a meta-analysis of 18 domestic and foreign studies (VAK or SCOPUS publications) on the application of digital technologies in construction, as well as an effectiveness assessment of the studied technologies.

Results. The advantages of unmanned aerial vehicles and mapping drones are undeniable, as well as the difficulties in using them in urban environments, especially in the centers of million cities. The main advantages of using drone technologies in construction include reception of detailed data from construction sites and their comparison with design documentation; objective monitoring of construction dynamics; a reduction in the number of occupational health and safety violations; improved quality of site monitoring and round-the-clock access to hard-to-reach areas; assessment of the scope of work performed; prompt response to deviations from design documentation and timely corrective actions; work with the BIM (Building Information Model) and digital model of the current object with the possibility of export to convenient CAD programs. The main disadvantages of using drone technology in construction are as follows: the maximum wind resistance of 15 m/s; the data obtained during rain or snowfall may be incorrect; the impossibility of automatic imaging within the project under construction.

Conclusions. The Pix4D Crane Camera is currently the safest solution for capturing aerial images, with subsequent conversion to 2D and 3D.

Keywords: drone technologies, digital technologies, information modeling, construction monitoring, construction digitalization

For citation: Losev D.M. Digital technologies for remote control and monitoring of construction works. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;41(2):148–157. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2\(41\)-148-157](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-2(41)-148-157)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all the aspects of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 20.03.2024

Revised 23.04.2024

Accepted 02.05.2024

Введение

Во всем мире строительная отрасль занимает около 8–10% от валового внутреннего продукта стран, обеспечивает занятость трудового населения и выступает связующим звеном между различными отраслями промышленности и экономики. Однако доля процессов с применением цифровых технологий в строительной отрасли меньше, чем в других сферах народного хозяйства, таких как торговля, автомобилестроение, банковский сектор и государственное управление.

В Российской Федерации на государственном уровне принято решение об уже давно назревшем переходе на стандарты цифровизации отрасли, которые доказали свою эффективность во всем мире. Говоря о потенциале и актуальности внедрения цифровых решений при проектировании, строительстве и эксплуатации мостов, необходимо учитывать, что сегодня практически у всех крупных структур, занятых в данных сферах, идет активная работа по внедрению технологии информационного моделирования и контроля. Это позволит избежать множества недостатков при отдельных процессах проектирования, строительства и эксплуатации мостовых сооружений в рамках проектов автомобильных дорог.

Целью данной работы является изучение применения современных цифровых технологий на строительных площадках.

Беспилотные летательные аппараты в строительстве

Для увеличения возможной прибыли стоящие во главе строительные компании внедряют в строительное производство новейшие цифровые технологии, что, в свою очередь, позволяет повысить качество и уменьшить финансовые расходы [1].

Внедрение в процессы строительства беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – дронов – является одной из таких инноваций. Дрон по своей сути является летающей камерой с возможностью установки на него различного оборудования (сканер, тепловизор, газоанализатор, лидар) для выполнения необходимых задач. Управлением занимается оператор с помощью пульта либо автономно по заранее составленному плану полета [2].

Развитие БПЛА происходит стремительными темпами, и сам масштаб задач, связанных со строительством, способствует этому. Основной задачей, в которой задействованы БПЛА, является топографическая съемка. Перед началом строительства необходимо собрать необходимую информацию об участке территории, на которой планируется возведение объекта.

Полученная информация позволит провести грамотный анализ и принять взвешенное решение по вопросам планирования строительной площадки, облегчит проектировщикам выполнение своих задач [3, 4].

В последние годы для работы по созданию топографической карты все чаще применяются дроны. При этом возрастает качество выполняемой работы в сравнении с традиционными методами.

Преимущества использования БПЛА:

- Уменьшение длительности, снижение затрат на процесс полевых работ. При применении классических наземных методов на сбор необходимого объема информации с большой площади для получения результата могут потребоваться недели [5].

- Отсутствие логистических сбоев.

- Точность измерений. Камера выполняет съемку в разрешении 4К, вследствие чего из серии снимков, с разных ракурсов, с последующей обработкой в программных комплексах, получается создать детализированную 3D-модель рассматриваемого участка земли и находящихся на нем зданий и сооружений [6].

- Работа на труднодоступных территориях. Поскольку управление БПЛА происходит дистанционно, нахождение специалистов, ведущих геодезическую съемку, непосредственно в исследуемом районе не требуется [7].

- Городское планирование. За прошедшие годы разработки в области совершенствования БПЛА расширили область применения в городском планировании. Дроны позволяют изучать имеющиеся экологические и социальные условия на объекте исследования [8]. Позволяют анализировать полученные данные о городском трафике с помощью нейросетей, изучать трансформирующуюся инфраструктуру города. Дроны облегчают возможность исследования деградаций в окружающей среде, гидрологических изменениях и позволяют сравнивать собранную информацию за период отслеживания [9].

- Повышение безопасности на строительных площадках. Задача работодателей, в частности строительных компаний, обеспечить безопасность и уменьшить производственный травматизм на рабочем месте. Применение БПЛА обеспечивает выполнение этой задачи, например дроны могут отслеживать наличие на рабочих касок, устройство строительных лесов.

- Инспекция кровли и техническое обслуживание зданий. Одно из применений БПЛА – это инспекция и контроль зданий и сооружений, позволяющие без риска и в кратчайшие сроки осмотреть труднодоступные места, например осмотр кровли или труднодоступных конструкций под пролетом моста или путепровода [10].

В отличие от традиционных методов контроля, требующих финансово затратного, травмоопасного и трудоемкого инструментария, применение беспилотных летательных аппаратов компаниями, занятыми процессами строительства, позволяет сократить время инспекций, увеличить эффективность, безопасность и сократить финансовые издержки, возникающие в процессе строительства [11]. Если для сбора информации и проведения инспекций требуется беспилотный летательный аппарат и используемое для обработки полученной информации программное обеспечение, то его можно взять в аренду. Такой вариант оптимален для частных лиц и может быть рассмотрен, например, при строительстве частного дома или покупке участка земли. В свою очередь, строительным организациям или негасовым компаниям, обслуживающим трубопроводы, для проведения систематических проверок необходимо иметь БПЛА в собственности так же, как и сотрудников в штате,

обученных работе с ними, что позволит избежать лишних затрат на постоянную аренду и техобслуживание [12].

При использовании БПЛА для обнаружения повреждений в конструкциях, таких как трещины, протечки, работы проходят безопаснее и точнее, что, в свою очередь, увеличивает скорость оценки и принятия решения в отношении проблемы, а также уменьшает материальные издержки. В сравнении с традиционными методами инспекции сэкономленное время исчисляется сотнями рабочих человеко-часов [9].

Также дроны можно применять и для инспекции солнечных панелей, так как камера имеет высокое разрешение записи, что позволит в полной мере оценить их состояние и принять решение о необходимости техобслуживания.

Одно из актуальных направлений развития дрон-технологий – это тепловизионная диагностика. При установке на дрон специального модуля, а именно тепловизионной камеры, открываются новые возможности для эффективного контроля за трубопроводами, крышами, электрическими сетями. Камера позволяет зафиксировать инфракрасное излучение, излучаемое при нарушении изоляции, что, в свою очередь, ведет к перегреву и утечке.

Высокое разрешение съемки позволяет обнаруживать область с тепловыми сигнатурами, которые глаз человека распознать не может. Дроны с установленными на них тепловизионными камерами справляются с поиском места нарушения изоляции быстрее и эффективнее, чем при традиционном методе, в котором необходимо вручную просканировать всю потенциальную область и только в доступных для прохождения местах. Уменьшение времени инспекции снижает затраты, а также повышает качество за счет получения снимков высокого разрешения [13].

Неотъемлемой частью любого инвестиционного объекта является его реклама и маркетинг, презентация, демонстрация от начала строительства до ввода в эксплуатацию. Дрон позволяет получать фотографии с разных ракурсов, а также может создавать высококачественные панорамные снимки.

Принцип работы беспилотных летательных аппаратов для решения задач контроля строительства на примере топографической съемки:

- сканирование строительной площадки для создания трехмерного изображения с высоким разрешением;
- специализированная цифровая платформа анализирует полученную с помощью БПЛА топографическую съемку и сравнивает ее с проектной документацией;
- проектировщики, менеджеры проекта, мастера, прорабы, инженеры, используя специализированную цифровую платформу, получают необходимую информацию для решения поставленных индивидуальных задач в общем процессе строительного производства.

HIVE – первая компания, которая спроектировала и запустила производство серийных дронопортов на российском рынке. Дронопорты уже зарекомендовали себя на объектах строительства Сколково и Иннополиса.

В 2020 году данный проект был представлен на международной выставке GITEX в ОАЭ и даже с минимальным постпродакшеном собрал вокруг себя большой интерес среди инвесторов в строительной отрасли и нефтяной промышленности.

HIVE – это комплексное автоматизированное решение по аэромониторингу и «умному» анализу данных. В режиме реального времени, с применением технологии искусственного

интеллекта, HIVE автоматизирует работу критически важных индустрий, исключая человеческий фактор и затраты на постобработку данных, полученных с воздуха.

Необходимая регулярность вылета дрона назначается застройщиком или заказчиком из установленного на отдельном участке, близком к строительной площадке, дронопорта. Вылеты происходят в автоматическом или ручном режиме по заранее заданному маршруту. Тем самым дроны осуществляют контроль за производством строительных работ, следят за выполнением требований техники безопасности, информируют застройщика и заказчика о ситуации на площадке в режиме реального времени. Параллельно с камер дрона ведется видеозапись полета [14].

В отличие от зарубежных аналогов отечественный производитель имеет ряд положительных отличий, а именно:

- автоматическая замена аккумулятора, благодаря сменным блокам подзарядки станция с дроном работает 24/7;
- дронопорт работает в любых климатических районах;
- в станцию встроен охранный модуль и климат-контроль;
- площадь охвата одного дронопорта 100 км².

Управление и контроль за работой беспилотников происходит на разработанной веб-платформе. Для создания полетного задания необходимо выбрать нужную станцию на интересующей строительной площадке и построить миссию, отражая в ней все необходимые параметры (высоту, скорость, точки интереса), а также действия (запись, панорама, поворот камеры, наклон камеры, зум, съемка по времени, съемка по расстоянию). При необходимости можно наблюдать за ходом миссии online. После завершения миссии происходит автоматическая отправка полученных данных на облачный сервис для дальнейшей работы.

К дополнительным возможностям можно отнести круглосуточный мониторинг с камер видеонаблюдения на дронопорте, две на улице и две внутри, отображение погодных условий в реальном времени со встроенной в дронопорт метеостанцией, передачу информации о состоянии аккумуляторов во время полета, а также возможность перехвата в ручное управление, приостановление миссии и принудительное возвращение дрона на станцию [15].

Возможности дронов от HIVE при контроле за строительством:

- фотографический план местности и геодезическая привязка в необходимой системе координат;
- вычисление объемов земляных работ, сыпучих материалов;
- оценка выполненных работ по площади и анализ отклонений от проекта;
- автоматическое распознавание факта ношения или отсутствия рабочих касок и средств индивидуальной защиты;
- создание 3D-модели объекта с геопривязкой к необходимым координатам для последующих вычислений и работы;
- охрана территории.

Регулярные полеты дронов гарантируют защиту от проникновения на территорию посторонних лиц. Современная система дрона по обнаружению препятствий позволяет беспилотнику легко маневрировать среди оборудования.

Применение технологии Crane Camera на строительной площадке

Crane Camera – это усовершенствованная система камер, устанавливаемая на стрелу башенного крана и подключенная к программному обеспечению фотограмметрии от компании Pix4Dbim.

Всепогодная система камер работает от системы «жизнедеятельности» крана и разработана для того, чтобы выдерживать вибрации крана, одновременно обеспечивая высокое качество изображения при движении крана. После установки камера будет автоматически делать фотографии объекта каждый день в одно и то же время и загружать результаты в облако Pix4Dbim. Все необходимые настройки выполняются удаленно, через облачный сервис, и нет необходимости снимать камеру с крана. В свою очередь, оператор крана не должен делать ничего, кроме своей обычной работы. Каждый день система автоматически собирает изображения и передает их в облако Pix4Dbim через Wi-Fi или соединение 4G. Затем изображения автоматически обрабатываются и преобразуются в 2D-масштабированные и привязанные к географическим координатам ортофотопланы, 3D-облака точек, 3D-модели сетки и 2D-карты рельефа.

Возможности Crane Camera:

- Облако Pix4Dbim преобразует изображения в ортофотопланы и 3D-модели, которые можно измерять, анализировать и сравнивать с чертежами САПР.

- Результаты можно отправлять команде, работающей над проектом, одним нажатием кнопки, также есть возможность экспортировать в стороннее программное обеспечение BIM или CAD для дальнейшего анализа.

- С Crane Camera нет необходимости заходить на сайт, чтобы собирать или анализировать результаты. Никакого вмешательства человека не требуется, поэтому нет необходимости в специальной подготовке. Как только система будет установлена и закреплена на крановой стреле, результаты будут получены автоматически.

- Значительная экономия финансов и времени. В любое время можно посмотреть, что происходило на строительной площадке в определенный день.

Преимущества Crane Camera Pix4D перед дронами:

Если у дрона нет возможности автоматической работы и для его работы необходим оператор, то Crane Camera работает в любую погоду, ей не важна температура, ветер, она не может разрядиться или попасть в аварию.

Преимущества Crane Camera Pix4D перед веб-камерами:

- Благодаря Crane Camera качество и четкость изображений значительно выше, чем у веб-камеры, значительно различаются выходные данные по полноте предоставляемой информации.

- Программное обеспечение Pix4D использует расширенный анализ изображений и фотограмметрические алгоритмы для обработки изображений, что приводит к созданию 2D-мозаик изображений, которые являются фотограмметрическими. Будучи безразмерными и масштабированными, эти 2D-ортофотопланы могут использоваться для измерения расстояний и поверхностей. Более того, их можно сравнить с чертежами CAD/BIM, используемыми на объекте.

- Благодаря GPS, включенному в систему камер, изображения имеют точную географическую привязку в реальных координатах. Это означает, что результаты полностью совместимы с системами BIM, CAD и GIS.

Планирование и мониторинг строительной площадки в тесной городской застройке является сложной задачей. Ограниченное пространство требует более тщательного планирования и отчетности. Эффективно координировать поставки материалов и сводить к минимуму дублирующие поставки, в полной мере использовать все имеющиеся квадратные метры, в том числе и в случае хранения материалов на строительной площадке, возможно осуществить с помощью Crane Camera Pix4D [16, 17].

Заключение

В Минстрое ожидают, что применение технологий информационного моделирования только в процессе проектирования и строительства позволит достичь экономии до 20 % средств на возведение объекта. Кроме того, использование информационных технологий должно снизить административные барьеры и сократить сроки возведения объекта.

Список литературы

1. Aicardi I., Chiabrando F., Grasso N., Lingua A.M., Noardo F., Spanò A. UAV Photogrammetry with Oblique Images: First Analysis on Data Acquisition and Processing. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*. 2016;XLI-B1:835–842. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b1-835-2016>
2. Носков И.В., Носков К.И., Тиненская С.В., Ананьев С.А. Дрон-технологии в строительстве-современные решения и возможности. *Вестник евразийской науки*. 2020;12(5):27. Режим доступа: <https://esj.today/PDF/37SAVN520.pdf>
3. Yang C.H., Wen M.C., Chen Y.C., Kang S.C. An Optimized Unmanned Aerial System for Bridge Inspection. In: *Proceedings of the 32nd ISARC, Oulu, Finland*. 2015; pp. 625–630. <https://doi.org/10.22260/isarc2015/0084>
4. Кудасова А.С., Тютина А.Д., Сокольников Э.В. Применение беспилотных летательных аппаратов в строительстве. *Инженерный вестник Дона*. 2021;[8]:31–38.
5. Ellenberg A., Branco L., Krick A., Bartoli I., Kontsos A. Use of Unmanned Aerial Vehicle for Quantitative Infrastructure Evaluation. *Journal of Infrastructure Systems*. 2014;[21]:21–27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000246](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000246)
6. Ham Y., Han K.K., Lin J.J., Golparvar-Fard M. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. *Visualization in Engineering*. 2016;[1]:289–296. <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0029-z>
7. Бердников А.Д., Коркишко А.Н. Применение беспилотных летательных аппаратов при строительстве и обустройстве нефтегазовых объектов. В: Погорелова С.Д. (ред.). *Проблемы инженерного и социально-экономического образования в техническом вузе в условиях модернизации высшего образования: Материалы XXII Междунар. науч.-практ. конф., Тюмень, 27–28 апреля 2023 г. Т. 2*. Тюмень: Тюменский индустриальный университет; 2023, с. 21–23.
8. Daponte P., De Vito L., Mazzilli G., Picariello F., Rapuano S. A height measurement uncertainty model for archaeological surveys by aerial photogrammetry. *Measurement*. 2017;[98]:192–198. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.033>
9. Котова Т.В. О вопросах применения БПЛА в строительстве и благоустройстве территории. В: *Исследования изменений атмосферы, климата и динамики ландшафтов: материалы V Кавказского Международного экологического форума, Грозный, 20–21 декабря 2021 г. Грозный: Чеченский государственный университет им. Ахмата Абдулхамидовича Кадырова; 2021, с. 158–160*. <https://doi.org/10.36684/53-2021-1-158-160>
10. Котова Т.В. Важные применения дронов и БПЛА в мониторинге строительства. В: *Развитие науки в XXI веке: сб. науч. тр. по материалам I Междунар. междисциплинарной конф., Москва, 22 марта 2022 г. Москва: Научно-издательский центр Толмачево; 2022, с. 5–8*.
11. Мустафинов К.Д. БПЛА в строительстве. В: *Наука и инновации – современные концепции: сб. науч. ст. по итогам работы Междунар. науч. форума, Москва, 27 марта 2020 г. Т. 1*. Москва: Инфинити; 2020, с. 83–87.

12. Лаборов В.А., Гамаюнова О.С. Робототехника и bim-технологии в строительстве. Инженерные исследования. 2021;(5):15–22.
13. Perritt H.H. Jr., Sprague E.O. Domesticating Drones: The Technology, Law, and Economics of Unmanned Aircraft. London: Routledge; 2016. <https://doi.org/10.4324/9781315577999>
14. HIVE. Autonomous drone solutions [internet]. Available at: <https://hive.aero/>.
15. Мураховский М.В., Ильина Л.А. Перспективы рынка фуднет для продвижения передовых стартапов по производству инновационных продуктов питания. В: Обеспечение научно-технологического суверенитета АПК: роль государства, науки и бизнеса: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. Москва: ВИАПИ им. А.А. Никонова; 2023, с. 22–25.
16. Roberts D., Bretl T., Golparvar-Fard M. Detecting and classifying cranes using camera-equipped UAVs for monitoring crane-related safety hazards. In: Computing in Civil Engineering 2017. Proceedings; 2017, pp. 442–449. <https://doi.org/10.1061/9780784480847.055>
17. Sutjaritvorakul T., Vierling A., Berns K. Data-driven worker detection from load-view crane camera. In: Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). IAARC Publications; 2020, pp. 864–871. <https://doi.org/10.22260/isarc2020/0119>
18. Абрамян С.Г., Бурлаченко А.О., Кумов А.В. Перспектива и опыт применения беспилотных летательных аппаратов в строительстве. В: Актуальные проблемы и перспективы развития строительного комплекса: сб. тр. Междунар. науч.-практ. конф., Волгоград, 1–2 декабря 2020 г. Т. 2. Волгоград: Волгоградский государственный технический университет; 2020, с. 10–14.

References

1. Aicardi I., Chiabrando F., Grasso N., Lingua A.M., Noardo F., Spanò A. UAV Photogrammetry with Oblique Images: First Analysis on Data Acquisition and Processing. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences. 2016;XLI-B1:835–842. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-xli-b1-835-2016>
2. Noskov I.V., Noskov K.I., Tinenskaia S.V., Ananov S.A. Dron-technologies in construction – modern solutions and opportunities. The Eurasian Scientific Journal. 2020;12(5). Available at: <https://esj.today/PDF/37SAVN520.pdf>. (In Russian).
3. Yang C.H., Wen M.C., Chen Y.C., Kang S.C. An Optimized Unmanned Aerial System for Bridge Inspection. In: Proceedings of the 32nd ISARC, Oulu, Finland. 2015; pp. 625–630. <https://doi.org/10.22260/isarc2015/0084>
4. Kudasova A.S., Tyutina A.D., Sokolnikova E.V. Application of unmanned aerial vehicles in construction. Engineering journal of Don. 2021;(8):31–38. (In Russian).
5. Ellenberg A., Branco L., Krick A., Bartoli I., Kotsos A. Use of Unmanned Aerial Vehicle for Quantitative Infrastructure Evaluation. Journal of Infrastructure Systems. 2014;(21):21–27. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000246](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000246)
6. Ham Y., Han K.K., Lin J.J., Golparvar-Fard M. Visual monitoring of civil infrastructure systems via camera-equipped Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): a review of related works. Visualization in Engineering. 2016;(1):289–296. <https://doi.org/10.1186/s40327-015-0029-z>
7. Berdnikov A.D., Korkishko A.N. The use of unmanned aerial vehicles in the construction and arrangement of oil and gas facilities. In: Pogorelova S.D. (ed.). Problems of engineering and socio-economic education in a technical university in the context of modernization of higher education: Materials of the XXII International Scientific and Practical Conference, Tyumen, April 27–28, 2023. Vol. 2. Tyumen: Industrial University of Tyumen; 2023, pp. 21–23. (In Russian).
8. Daponte P., De Vito L., Mazzilli G., Picariello F., Rapuano S. A height measurement uncertainty model for archaeological surveys by aerial photogrammetry. Measurement. 2017;(98):192–198. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.11.033>
9. Kotova T.V. On the use of UAVs in construction and landscaping. In: Studies of changes in the atmosphere, climate and landscape dynamics: proceedings of the V Caucasian International Environmental Forum, Grozny, December 20–21, 2021. Grozny: Kadyrov Chechen State University; 2021, pp. 158–160. (In Russian). <https://doi.org/10.36684/53-2021-1-158-160>

10. *Kotova T.V.* Important applications of drones and UAVs in construction monitoring. In: The development of science in the XXI century: collection of scientific papers based on the materials of the I International Interdisciplinary Conference, Moscow, March 22, 2022. Moscow: Scientific Publishing Center Tolmachevo; 2022, pp. 5–8. (In Russian).
11. *Mustafinov K.D.* UAVs in construction. In: Science and innovation – modern concepts: collection of scientific articles based on the results of the work of the International Scientific Forum, Moscow, March 27, 2020. Vol. 1. Moscow: Infiniti Publ.; 2020, pp. 83–87. (In Russian).
12. *Laborov V.A., Gamayunova O.S.* Robotics and BIM technologies in construction. *Inzhenernyye issledovaniya = Engineering Research*. 2021;(5):15–22. (In Russian).
13. *Peritt H.H. Jr., Sprague E.O.* Domesticating Drones: The Technology, Law, and Economics of Unmanned Aircraft. London: Routledge; 2016. <https://doi.org/10.4324/9781315577999>
14. HIVE. Autonomous drone solutions [internet]. Available at: <https://hive.aero/>.
15. *Murakhovsky M.V., Ilyina L.A.* Prospects of the foodnet market for the promotion of advanced startups for the production of innovative food products. In: Ensuring the scientific and technological sovereignty of the agro-industrial complex: the role of the state, science and business: collection of materials of the International Scientific and Practical Conference. Moscow: RIAPI named after A.A. Nikonov; 2023, pp. 22–25. (In Russian).
16. *Roberts D., Bretl T., Golparvar-Fard M.* Detecting and classifying cranes using camera-equipped UAVs for monitoring crane-related safety hazards. In: Computing in Civil Engineering 2017. Proceedings; 2017, pp. 442–449. <https://doi.org/10.1061/9780784480847.055>
17. *Sutjaritvorakul T., Vierling A., Berns K.* Data-driven worker detection from load-view crane camera. In: Proceedings of the 37th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC). IAARC Publications; 2020, pp. 864–871. <https://doi.org/10.22260/isarc2020/0119>
18. *Abrahamyan S.G., Burlachenko A.O., Kumov A.V.* Perspective and experience of using unmanned aerial vehicles in construction In: Actual problems and prospects of development of the construction complex: proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Volgograd, 1–2 December 2020. Vol. 2. Volgograd: Volgograd State Technical University; 2020, pp. 10–14. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Данила Михайлович Лосев, студент-магистрант по направлению «Цифровое строительство», Тюменский индустриальный университет, Тюмень

e-mail: losev_21@mail.ru

Danila M. Losev, Master's degree student, "Digital Construction", Industrial University of Tyumen, Tyumen

e-mail: losev_21@mail.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



СНИИСК
ИИМ В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИИМ А.А. ПРОСВЕТА



НИИОСП
ИИМ 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»

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@dstroy.ru



МИНСТРОЙ
РОССИИ



ниц строительство
научно-исследовательский центр



ВНИИСК
ИЛ ГА КРУЧЕНКО



ВНИИЖБ
ИЛ ГАЛ ТВОЗДЕВА



ВНИИОСП
ИЛ ИЛ ГОТЦЕНКО

II МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОНГРЕСС

Наука и инновации

forum-cstroy.ru



Москва
2025

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»
Вып. 2(41) 2024

Редактор выпуска Починина Н.Е.
Компьютерная верстка Чорненький С.И.

Дата выхода в свет: 30.06.2024 г. Формат 70×100/16
Бумага мелованная. Офсетная печать.
Тираж 500 экз. Заказ № 1591

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