



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



ИВАНОВ ИВАНОВИЧ



ИВАНОВ ИВАНОВИЧ



ИВАНОВ ИВАНОВИЧ

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

№ 2(37) 2023

с 1927 года
95
ЛЕТ

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ
СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ





НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

с 1927 года
95
ЛЕТ

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 2(37) 2023

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(37) 2023

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
Москва, Российская Федерация

КОЛЫБИН Игорь Вячеславович, канд. техн. наук
НИИОСП им. Н.М. Герсевича
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
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»,
Москва, Российская Федерация

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

ТЕР-МАТИРОСЯН Армен Заверенович, 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

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(37) / под ред. А.И. Звездова. –
М.: АО «НИЦ «Строительство», 2023. – 174 с.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI журнала: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI выпуска: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37))
В действующем Перечне ВАК от 31.05.2023 г.
под номером 570.

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», 2023

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),
Nizhny 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 (TSNIISK)
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)
Moscow, Russian Federation

KOLYBIN Igor V., Cand. Sci. (Engineering)
Research Institute of Bases and Underground Structures
(NIIOBP) 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

NESVETAIEV 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 (TSNIISK)
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
Research Institute of Building Constructions (TSNIISK)
named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center
of Construction, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

CHELISHKOV 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(37) / edited by A.I. Zvezdov. –
M.: JSC Research Center of Construction, 2023. – 174 p.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI journal <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI issue [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37))
In the current version of List of HAC from May 31, 2023
our journal has a number 570.

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, 2023

Содержание

Строительные конструкции, здания и сооружения

Коротков В.А.

Анализ динамических методов расчета строительных конструкций АЭС 7

Мозголов М.В., Козлова Е.В.

Модель комплекса SCAD из объемных конечных элементов: расчет железобетонных кессонных перекрытий 18

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 37

Фарфель М.И., Михайлик Е.Д.

Экономия стали в колонне промышленного здания при учете влияния жесткости подкрановой балки 71

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Ростовцев А.В.

Новая методика испытаний крупнообломочных грунтов «жидким штампом» 84

Строительные материалы и изделия

Зарипов М.З., Мухаметзянов З.Р., Пудовкин А.Н.

Особенности применения механизированной сварки с каплепереносом при ремонте эксплуатируемых трубопроводов 98

Обозов В.И., Пономарев О.И., Иванова А.Ю.

Деформирование кладки из крупноформатных камней 107

Соколов Б.С., Титаев В.А., Черный И.А.

Актуализация межгосударственного стандарта «Плиты железобетонные для покрытия трамвайных путей» 116

Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Хлебников С.К.

Мониторинг нормативных документов США и РФ в области требований к бетону и железобетону 125

Управление жизненным циклом объектов строительства

Квасников А.А., Сумароков Е.В.

Оптимизация армирования железобетонных конструкций зданий и сооружений при автоматизации процессов проектирования 136

Крылов А.Д.

Машиночитаемые документы в стандартах по информационному моделированию в строительстве 151

В помощь аспирантам

Федоркина А.П.

Научно-исследовательская деятельность: логика и методология 159

Contents

Building constructions, buildings and structures

Korotkov V.A.
Analysis of dynamic methods for calculating NPP building structures 7

Mozgolev M.V., Kozlova E.V.
SCAD model of solid finite elements: calculation of reinforced concrete waffle slabs..... 18

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 37

Farfel M.I., Mikhailik E.D.
Steel savings in an industrial building column with account for effect of crane girder stiffness..... 71

Foundations, underground structures

Rostovtsev A.V.
New methodology for testing very coarse soils by “liquid plate loading” 84

Building materials and products

Zaripov M.Z., Mukhametzyanov Z.R., Pudovkin A.N.
Specific features of applying machine welding with drop transfer in repair of operating pipelines 98

Obozov V.I., Ponomarev O.I., Ivanova A.Yu.
Deformation of large stones masonry..... 107

Sokolov B.S., Titaev V.A., Cherny I.A.
Update of the interstate standard “Reinforced concrete slabs for tramway track pavements” 116

Stepanova V.F., Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Khlebnikov S.K.
Monitoring of standard documents of the USA and Russian Federation in terms of requirements for concrete and reinforced concrete 125

Lifecycle management of construction projects

Kvasnikov A.A., Sumarokov E.V.
Optimizing the reinforcement of buildings and structures in automatic design processes 136

Krylov A.D.
Machine-readable documents in building information modeling standards 151

Support materials for postgraduate students

Fedorkina A.P.
Research activities: logic and methodology 159

УДК 699.841

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

EDN: AHMCTL

АНАЛИЗ ДИНАМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭС

В.А. КОРОТКОВ, канд. техн. наук

ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности» Ростехнадзора,
ул. Малая Красносельская, д. 2/8, к. 5, Москва, 107140, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В настоящей статье представлены материалы по анализу сейсмостойкости строительных конструкций различных зданий, включая строительные конструкции АЭС. Данные материалы являются обобщением результатов многолетней работы автора в области динамики строительных конструкций.

Материалы и методы. Материалы содержат определение концепции динамики, расчетное моделирование динамических процессов, основные соотношения методов динамического анализа, описание воздействий (акселерограмм), понятие резонанса, применение вибродиагностики в динамическом анализе, оценку прочности и устойчивости зданий, описание применяемых программных комплексов. При этом следует отметить, что часть представленных материалов статьи имеет научную новизну.

1. Метод неклассической модальной суперпозиции определения отклика конструкции при динамическом воздействии и поэтажных спектров ответа был представлен автором на международной конференции по ABAQUS (SIMULIA) в Барселоне в 2011 г. Суть метода в достоверном учете «грунтового» демпфера, моделирующего отток энергии в грунт при колебаниях здания, что обеспечивает получение достоверных результатов.

2. Фундаментальное решение учета податливости фундаментной плиты при сейсмических воздействиях.

3. Метод учета податливости фундаментной плиты обеспечивает реалистическое определение отклика конструкции при сейсмическом воздействии, а также позволяет определять поэтажные спектры ответа при падении самолета для зданий, воздействие на оборудование которых передается через фундаментную плиту.

4. Метод учета динамических характеристик фрагментов (пол/стена) зданий, полученных по результатам вибродиагностики, для верификации расчетных моделей, а также для анализа прочности и поэтажных спектров ответа.

5. В приложении представлена разработанная автором, реалистическая тестовая задача по сейсмическому анализу.

Результаты. Статья является обобщением результатов многолетней работы автора в области строительных конструкций АЭС. Материалы содержат научную новизну и имеют широкое практическое применение при разработке проектов АЭС как в РФ, так и за рубежом.

Выводы. Материалы, представленные в статье, могут быть использованы при подготовке курса лекций «Введение в динамику», в том числе, возможно, и для стран-новичков, которые находятся в начале пути строительства объектов использования атомной энергии (ОИАЭ).

Ключевые слова: классический и неклассический методы модальной суперпозиции, поэтажные спектры ответа, вибродиагностика, взаимодействие сооружения с грунтовым основанием, эквивалентные жесткости и затухания

Для цитирования: Коротков В.А. Анализ динамических методов расчета строительных конструкций АЭС. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):7–17. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

Вклад автора

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

Финансирование

Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.04.2023

Поступила после рецензирования 15.05.2023

Принята к публикации 30.05.2023

ANALYSIS OF DYNAMIC METHODS FOR CALCULATING NPP BUILDING STRUCTURES

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

*Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Malaya Krasnoselskaya str., 2/8, bld. 5, Moscow, 107140,
Russian Federation*

Abstract

Introduction. The present article concerns the seismic performance of various building structures, including NPP objects. The provided materials generalize the results of the author's longstanding work connected with the dynamics of building structures.

Aim. To analyze the seismic performance of various building structures, including NPP objects, and represent the author's material on the dynamics of building structures.

Materials and methods. The presented materials include a definition of the dynamics concept, computational modeling of dynamic processes, main correlations of dynamic analysis methods, and a description of impacts (accelerograms). In addition, the concepts of resonance and vibration diagnostics in the dynamic analysis, assessment of the building strength and stability, as well as the description of applied software systems are provided. Some of the presented materials are characterized by the scientific novelty. The following methods were used in the study. The method of nonclassical modal superposition for determining the response of a structure under dynamic impacts together with floor response spectra were presented by the author at the ABAQUS (SIMULIA) International Conference in Barcelona, 2011. The essence of the method consists in the reliable account for a "soil" damper, modeling the energy outflow into the soil during the vibrations of a building, which ensures reliable results. A fundamental solution for accounting the ductility of the foundation slab under seismic impacts was applied. This method ensures the seismic response of the structure to be reliably determined, as well as the floor response spectra to be obtained in the conditions of the aircraft crashing for buildings, whose impact on the equipment is transmitted through the foundation slab. Additionally, the method of accounting the dynamic characteristics of building fragments (floor/wall), obtained using the vibration diagnostic results, was applied to verify computational models, as well as to analyze the strength and floor response spectra. The appendix includes the realistic test problem of the seismic analysis, developed by the author.

Results. The provided materials generalize the results of the author's longstanding work in the field of NPP building structures. In addition to the scientific novelty, the materials are widely applied in the development of NPP designs both in the Russian Federation and abroad.

Conclusion. The materials, presented in the article, can be used to prepare the "Introduction to Dynamics" lecture course, including, for newcomer countries that are at the beginning of the nuclear facility (NF) construction.

Keywords: classical and nonclassical modal superposition methods, floor response spectra, vibration diagnostics, soil base – structure interaction, equivalent stiffness and attenuation

For citation: Korotkov V.A. Analysis of dynamic methods for calculating NPP building structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):7–17. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-7-17](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-7-17)

Author contribution statement

The author takes responsibility of 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 13.04.2023

Revised 15.05.2023

Accepted 30.05.2023

Предисловие

После аварии на АЭС Фукусима в Японии в 2011 году и землетрясения магнитудой 7,8 балла в Турции в 2023 году вопросам обеспечения сейсмостойкости строительных конструкций, зданий и сооружений АЭС необходимо уделять повышенное внимание.

В представленных ниже материалах использовались инициированные автором лекции по динамике с применением программы ABAQUS, которые проводились в Швеции в 2005 г., материалы по аттестации ABAQUS 2018 в Ростехнадзоре в 2021 г., а также материалы по защите проектов АЭС в Индии в 2019 г.

Список определений

1. *Сейсмостойкость* – это способность конструкций сохранять предусмотренные проектом функции после сейсмического воздействия.

2. *Сейсмическое воздействие* – это особый вид нагрузки, возникающей при движении грунта из-за природных или техногенных факторов, например землетрясение, взрывы, движение транспорта.

Сейсмическое воздействие может описываться акселерограммой, велосиграммой, сейсмограммой, а также спектром ответа.

3. *Спектр ответа* – это зависимость максимальных ответных ускорений (скоростей или перемещений) линейного неконсервативного осциллятора от частоты при фиксированном значении затухания и при воздействии, заданном в виде акселерограммы.

Спектр ответа может определяться как на грунте для расчетов нагрузок на строительные конструкции, так и в местах расположения оборудования для расчетов нагрузок на оборудование.

Когда решаемая задача является динамической?

1. Решаемая задача является динамической, когда инерционные силы имеют важное значение и быстро изменяются во времени.
2. Инерционные силы пропорциональны ускорениям масс в конструкциях.
3. Если нагрузка меняется «достаточно медленно» и инерционные силы «малы», отклик можно рассматривать как квазистатический.
4. Иногда мы имеем большие инерционные силы, но можем выполнять статический анализ, так как нагрузка медленно меняется со временем, например, центробежная нагрузка.
5. Иногда задача о динамических колебаниях может эффективно решаться на основе модального анализа, когда для этого требуется учитывать небольшое количество мод колебаний.

Расчетное моделирование динамических процессов

Расчетное моделирование динамических процессов включает в себя разработку методик динамического анализа и разработку расчетных схем. Последующее выполнение динамических расчетов производится в соответствии с российскими и международными нормами сейсмостойкого проектирования.

Для выполнения расчетов зданий АЭС необходимо разработать конечно-элементные расчетные схемы, обеспечивающие геометрически подобное моделирование систем «сооружение + грунтовое основание». Для этого применяются следующие типы конечных элементов:

- треугольные и четырехугольные элементы пластинки/оболочки с учетом деформаций поперечного сдвига для моделирования конструктивных элементов зданий (пол, стена);
- балочные элементы, учитывающие деформации поперечного сдвига для моделирования колонн и ригелей;
- восьмиузловые элементы сплошной среды для моделирования грунтового массива в прямом методе анализа;
- элементы пружин и демпферов для моделирования жесткостных и диссипативных свойств грунта в методе импедансов;
- сосредоточенные массы (обобщенные) для моделирования различных единиц оборудования.

Система уравнений движения при сейсмических колебаниях «сооружения + грунтовое основание»

$$[K]U + [C]\dot{U} + [M]\ddot{U} = -[M]\ddot{U}_0, \quad (1)$$

где $[K]$ – матрица жесткости системы «сооружение + грунтовое основание»;
 $[C]$ – матрица демпфирования системы «сооружение + грунтовое основание»;
 $[M]$ – матрица массы сооружения;
 $U, \dot{U}, \ddot{U}$ – векторы относительных перемещений, скоростей и ускорений;
 $\ddot{U}_0$ – исходная акселерограмма.

Обоснование сейсмостойкости строительных конструкций АЭС необходимо проводить в соответствии с [1]. Для этого применяются представленные ниже методы.

Классический метод модальной суперпозиции (основан на разложении системы уравнений движения (1) по формам колебаний)

$$\ddot{q}_\beta + 2\xi_\beta \omega_\beta \dot{q}_\beta + \omega_\beta^2 q_\beta = (f_t)_\beta, \quad (2)$$

где $(f_t)_\beta$ – обобщенная сила.

В (2) учтены следующие условия ортогональности:

$$\Phi_\alpha^T K \Phi_\beta = \begin{cases} 0, & \alpha \neq \beta \\ \omega_\beta^2, & \alpha = \beta \end{cases}, \quad (3)$$

$$\Phi_\alpha^T M \Phi_\beta = \begin{cases} 0, & \alpha \neq \beta \\ 1, & \alpha = \beta \end{cases}, \quad (4)$$

$$\Phi_\alpha^T C \Phi_\beta = \begin{cases} 0, & \alpha \neq \beta \\ 2\xi_\beta \omega_\beta^2, & \alpha = \beta \end{cases}. \quad (5)$$

Неклассический метод модальной суперпозиции (основан на разложении системы уравнений движения (1) по формам колебаний)

$$\ddot{q}_\beta + C_{\beta\alpha} \dot{q}_\alpha + \omega_\beta^2 q_\beta = (f_t)_\beta. \quad (6)$$

Матрица затухания $C_{\beta\alpha}$ полностью заполненная. Данный метод рекомендуется применять как более точный по сравнению с классическим методом модальной суперпозиции, так как он позволяет достоверно учитывать «грунтовый» демпфер, моделирующий отток энергии в грунт при колебаниях здания.

В уравнениях (2)–(6) индексы α и β меняются от 1 до M , где M – число учитываемых форм колебаний.

Метод линейно-спектральной теории (основан на разложении системы уравнений движения (1) по формам колебаний)

- воздействие задается в виде спектра отклика;
- по данному спектру вычисляются сейсмические нагрузки для каждого тона колебаний;
- вычисляется суммарный сейсмический отклик, суммируя модальные отклики по специальным формулам;
- величины нагрузок зависят от тонов колебаний, но затем нагрузки рассматриваются как статические, поэтому метод является квазистатическим;
- преимущество метода состоит в прямом учете исходного целевого спектра в качестве исходного воздействия.

Методы прямого интегрирования (основаны на прямом пошаговом интегрировании уравнений движения (1) по неявной или явной схеме)

- Неявные схемы интегрирования преобразуют систему (1) в систему алгебраических уравнений, и на каждом шаге требуется выполнять обращение матрицы этой системы.

- Метод является безусловно устойчивым для любого шага интегрирования.
- Неявная схема интегрирования, реализованная в ПО ABAQUS, позволяет производить расчеты как с постоянным, так и с переменным шагом интегрирования по времени. В расчетах с переменным шагом интегрирования применяется оператор Гильберта, Хьюза, Тейлора, где начальный шаг интегрирования может вычисляться автоматически. При этом точность расчета зависит от заданного специальным образом остаточного члена, полученного на полушаге интегрирования. Учет переменного шага интегрирования по времени рекомендуется применять в расчетах при падении самолета и воздействии ВУВ, так как это существенно повышает эффективность расчетов, а сейсмические расчеты рекомендуется выполнять с постоянным шагом интегрирования.

- Явные схемы интегрирования. В явных схемах интегрирования перемещения, скорости и ускорения системы на каждом шаге интегрирования явно выражаются через их значения на предыдущем шаге. В явных схемах интегрирования обеспечивается их условная сходимость. Они сходятся только при шаге интегрирования, меньше некоторого критического значения (очень маленькая величина), поэтому данные схемы интегрирования могут быть неэффективны.

Достоинство методов прямого интегрирования заключается в возможности решения нелинейных задач.

В линейном анализе наиболее достоверные результаты обеспечивает неклассический метод модальной суперпозиции.

Сейсмические воздействия

При проектировании АЭС учитываются два уровня сейсмического воздействия:

- ПЗ (SL1) – наиболее сильное землетрясение, которое может произойти за срок эксплуатации АЭС;
- МРЗ (SL2) – максимально возможное землетрясение на данной площадке;
- ЗЗ – запроектное землетрясение интенсивности, превышающей уровни, установленные для целей проекта, в соответствии с [2] ЗЗ определяется для анализа запаса по сейсмостойкости.

Длительность землетрясений может достигать более 30 с – землетрясения в дальней зоне, менее 10 с – землетрясения в ближней зоне. Землетрясение в ближней зоне имеет более высокую интенсивность в вертикальном направлении, а землетрясение в дальней зоне – в горизонтальном направлении.

Резонанс

При сейсмических воздействиях возможны резонансные эффекты в зданиях АЭС. Необходимым условием возникновения резонанса является совпадение частоты собственных колебаний здания с частотой вынужденных колебаний акселерограммы. Кроме того, для раскачки колебаний необходимо порядка 20 циклов нагружения по данному тону. Вероятность возникновения резонанса наибольшая при землетрясениях в дальней зоне.

Методы определения поэтажных спектров ответа

Наиболее применяемым методом определения поэтажных спектров ответа является расчет с помощью интеграла Дюамеля. Однако более эффективным является применение явной схемы интегрирования.

Альтернативно поэтажные спектры ответа можно получить с помощью метода линейно-спектральной теории. Для этого в рассматриваемой конструкции необходимо задать неконсервативный осциллятор в месте расположения оборудования, а далее вычисляется максимальное ответное ускорение для различных значений частоты осциллятора и при воздействии на конструкцию, заданном в виде исходного спектра.

Применение вибродиагностики для решения динамических задач

Вибродиагностика может применяться как для новых энергоблоков, так и для эксплуатируемых, где необходимо учитывать факторы старения. По результатам вибродиагностики экспериментально определяются следующие динамические характеристики зданий и их фрагментов: частоты и формы собственных колебаний, модули деформации, логарифмические декременты колебаний.

Далее полученные динамические характеристики используются для верификации расчетных моделей и для последующего выполнения расчетов НДС, прочности строительных конструкций, а также для расчетов нагрузок на оборудование. При этом могут использоваться любые из перечисленных выше методов динамического анализа.

Определение прочности и устойчивости зданий

Определение прочности конструктивных элементов и устойчивости зданий производится для расчетного сочетания усилий нормальной эксплуатации, проектной аварии и сейсмического воздействия. Для оценки прочности конструктивных элементов производится сравнение рассчитанных напряжений и деформаций с предельно допустимыми значениями.

Задача устойчивости (недопустимость опрокидывания здания при динамических воздействиях) состоит в оценке опрокидывающего и восстанавливающего моментов с учетом взаимодействия сооружения и грунта.

Программы для ЭВМ, применяемые в динамическом анализе

При выполнении динамических расчетов зданий АЭС рекомендуется применять следующие программы для ЭВМ: ABAQUS (США), ANSYS (США), NASTRAN (США), SASSI (США), SCAD (Украина). Данные программы позволяют достоверно выполнить моделирование зданий АЭС с учетом взаимодействия «сооружения + грунтовое основание», кроме того, эти программы прошли аттестацию в Ростехнадзоре РФ.

Заключение

Автор не возражает прочитать лекции «Введение в динамику» на основе представленного материала для стран-новичков, которые находятся в начале пути строительства ОИАЭ.

Расчет схематизированной трехуровневой этажерки при сейсмическом воздействии

Рассматривается установленная на реальном грунте трехуровневая конструкция, состоящая из абсолютно жесткой фундаментной плиты толщиной 0,5 м, на которую опираются шесть колонн. Колонны служат опорами перекрытий на отметках 5, 10 и 15 м, имеющих толщину 0,3 м. Модель с указанием размеров сечений колонн и ригелей, а также точек вывода спектров отклика показана на рис. 1. Центр координат находится в точке пересечения диагоналей фундаментной плиты.

Характеристики бетона: плотность – 2500 кг/м³, модуль Юнга – $3,1 \times 10^{10}$ Па, масса модели – 262,3 т, затухание в материале – 4 %.

Характеристики грунта: плотность – 2000 кг/м³, скорость поперечных волн – 350 м/с, коэффициент Пуассона – 0,47, гистерезисное затухание – 2 %.

Грунт моделировался шестью пружинами и шестью демпферами с эквивалентными жесткостями и затуханиями из ASCE 4-16 [3], присоединенными в геометрическом центре фундаментной плиты. В табл. 1 представлены соответствующие характеристики грунта для штампа с размерами $L = 8$ м, $B = 4$ м.

Как видно из табл. 1, происходит существенный отток энергии в грунт при колебаниях системы, особенно высокое затухание реализуется при колебаниях в вертикальном направлении (54 %).

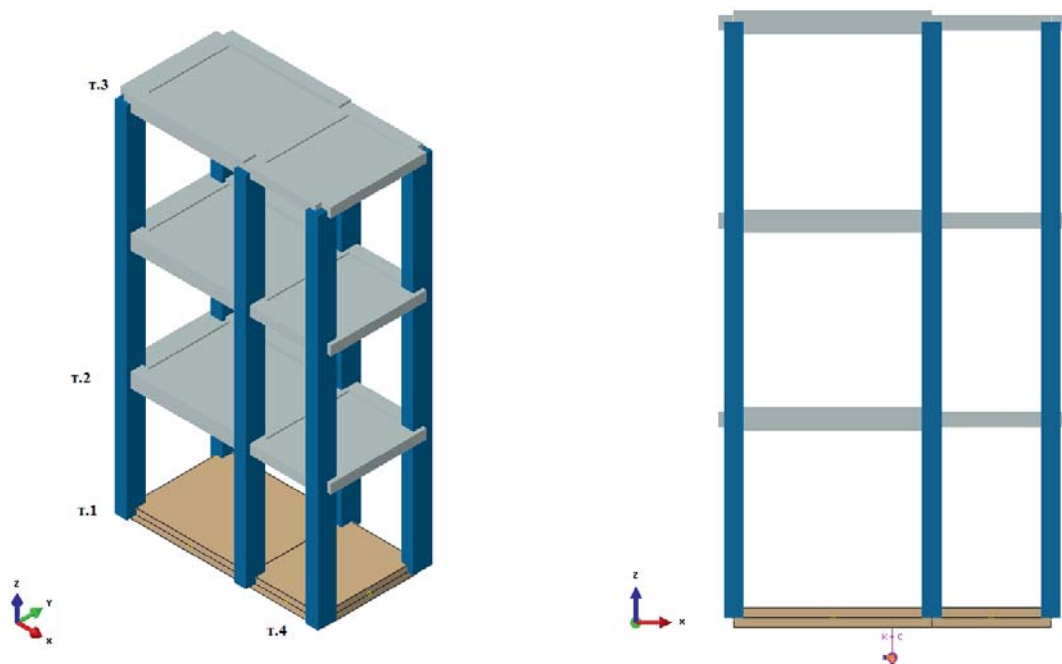


Рис. 1. Общий вид модели
Fig. 1. Model overview

Таблица 1

Эквивалентные жесткости и затухания для штампа

Table 1

Stamp equivalent stiffnesses and attenuations

Эквивалентная жесткость	Эквивалентное затухание	Относительное затухание
$K_x = 3,9 \cdot 10^6 \text{ кН/м}$	$C_x = 2,0 \cdot 10^4 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$	30 %
$K_y = 4,5 \cdot 10^6 \text{ кН/м}$	$C_y = 2,4 \cdot 10^4 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$	33 %
$K_z = 5,8 \cdot 10^6 \text{ кН/м}$	$C_z = 4,5 \cdot 10^4 \text{ кН}\cdot\text{с/м}$	54 %
$K_{\text{фх}} = 5,2 \cdot 10^6 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$C_{\text{фх}} = 3,2 \cdot 10^5 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}$	43 %
$K_{\text{фy}} = 1,4 \cdot 10^7 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$C_{\text{фy}} = 5,3 \cdot 10^5 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}$	42 %
$K_{\text{фz}} = 5,2 \cdot 10^7 \text{ кН}\cdot\text{м}$	$C_{\text{фz}} = 5,3 \cdot 10^4 \text{ кН}\cdot\text{с}\cdot\text{м}$	6,7 %

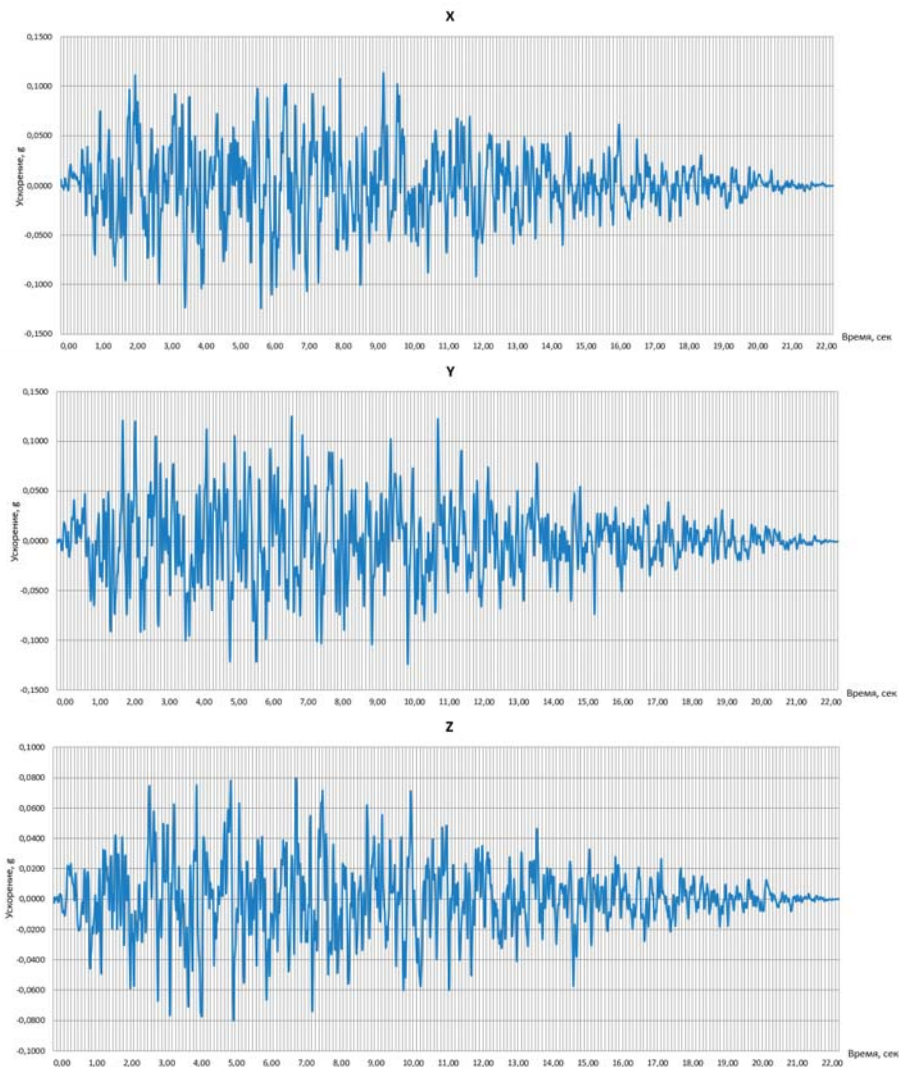


Рис. 2. Исходная трехкомпонентная акселерограмма
Fig. 2. Original three-component accelerogram

Таблица 2

Сравнительный анализ максимальных ускорений

Table 2

Comparative analysis of maximum accelerations

Номер точки	ABAQUS 2018	NX NASTRAN VERSION 11.0.2 2017	Погрешность, %
1	$a_x = -0,1261$ $a_x = +0,1131$ $a_y = -0,1244$ $a_y = +0,1257$ $a_z = -0,09235$ $a_z = +0,08966$	$a_x = -0,12712$ $a_x = +0,11338$ $a_y = -0,12441$ $a_y = +0,12553$ $a_z = -0,091523$ $a_z = +0,090225$	-0,8 -0,2 0,0 0,1 0,9 -0,6
2	$a_x = -0,1885$ $a_x = +0,2011$ $a_y = -0,1985$ $a_y = +0,1872$ $a_z = -0,09835$ $a_z = +0,09440$	$a_x = -0,18743$ $a_x = +0,1996$ $a_y = -0,20015$ $a_y = +0,18898$ $a_z = -0,098267$ $a_z = +0,09505$	0,6 0,8 -0,8 -0,9 0,1 -0,7
3	$a_x = -0,3556$ $a_x = +0,3148$ $a_y = -0,2847$ $a_y = +0,2310$ $a_z = -0,1097$ $a_z = +0,1020$	$a_x = -0,35419$ $a_x = +0,31208$ $a_y = -0,28802$ $a_y = +0,23128$ $a_z = -0,10955$ $a_z = +0,10297$	0,4 0,9 -1,2 -0,1 0,1 -0,9
4	$a_x = -0,1261$ $a_x = +0,1131$ $a_y = -0,1254$ $a_y = +0,1262$ $a_z = -0,1027$ $a_z = +0,1089$	$a_x = -0,12712$ $a_x = +0,11338$ $a_y = -0,1254$ $a_y = +0,126$ $a_z = -0,10173$ $a_z = +0,10833$	-0,8 -0,2 0,0 0,2 1,0 0,5

Исходное сейсмическое воздействие, представляющее собой трехкомпонентную акселерограмму, показано на рис. 2.

Результаты расчетов максимальных ускорений в точках 1, 2, 3, 4 (рис. 1), выполненных по программам ABAQUS, NASTRAN, представлены в табл. 2.

Максимальная погрешность расчетов, выполненных неклассическим методом модальной суперпозиции, составила 1,2 %.

Список литературы

1. НП-041-22. Требования по безопасности к строительным конструкциям зданий и сооружений атомных станций [интернет]. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ»; 2023. Режим доступа: https://docs.secnrs.ru/catalog/FNP/NP_041_22/

2. IAEA Safety Standards Series. Seismic Design for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG-67 [internet]. Vienna: IAEA; 2021. Available at: <https://www.iaea.org/publications/14664/seismic-design-for-nuclear-installations>

3. ASCE 4-16. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers; 2017.

4. Коротков В.А., Югай Т.З. Сейсмический расчет зданий АЭС с учетом податливости фундаментной плиты. Вестник НИЦ «Строительство». 2021;31(4):89–97. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-89-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-89-97)

References

1. NP-041-22. Safety Requirements to Civil Structures of NPP Buildings and Structures [internet]. Moscow: SECNRS; 2023. Available at: https://docs.secnrs.ru/catalog/FNP/NP_041_22/
2. IAEA Safety Standards Series. Seismic Design for Nuclear Installations. Specific Safety Guide No. SSG-67 [internet]. Vienna: IAEA; 2021. Available at: <https://www.iaea.org/publications/14664/seismic-design-for-nuclear-installations>
3. ASCE 4-16. Seismic Analysis of Safety-Related Nuclear Structures. American Society of Civil Engineers; 2017.
4. Korotkov V.A., Yugai T.Z. Seismic design of NPP structures taking into account foundation slab compliance. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021;31(4):89-97. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-89-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-89-97)

Информация об авторе / Information about the author

Владимир Анатольевич Коротков, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник отдела надежности строительных конструкций, ФБУ «Научно-технический центр по ядерной и радиационной безопасности», Москва

e-mail: korotkov@secnrs.ru

Vladimir A. Korotkov, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Department of Building Structure Reliability, Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, Moscow

e-mail: korotkov@secnrs.ru

УДК 624.01

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-18-36](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-18-36)

EDN: DPLFAF

МОДЕЛЬ КОМПЛЕКСА SCAD ИЗ ОБЪЕМНЫХ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ: РАСЧЕТ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КЕССОННЫХ ПЕРЕКРЫТИЙ

М.В. МОЗГОЛОВ, канд. техн. наук

Е.В. КОЗЛОВА✉

Коломенский институт (филиал) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», ул. Октябрьской революции,
д. 408, г. Коломна, 140402, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Современные требования на проектирование зданий обязывают проектировщиков применять конструкции, способные сопротивляться прогрессирующему обрушению. К таким конструкциям относится часторебристое железобетонное перекрытие кессонного типа. Пространственные системы являются многократно статически неопределимыми, их расчет осуществляется в программных комплексах, основанных на методе конечных элементов. Модели ребристых конструкций можно создать из различных типов конечных элементов. Усилия, определенные при помощи разных моделей, могут значительно отличаться. Это подтверждается примерами, имеющимися в литературе.

Целью работы является обнаружение простой и точной конечно-элементной модели для расчета на компьютере ребристого железобетонного кессонного перекрытия.

Материалы и методы. Методика выполнения работы предусматривает сравнение изгибающих моментов, полученных аналитическим способом, с данными метода конечных элементов вычислительного комплекса SCAD в балках кессонного перекрытия размером в плане 12,0 × 18,0 м с кессонами 1,5 × 2,25 м. Выполнен расчет стержневой модели, состоящей из системы перекрестных балок таврового сечения и твердотельной модели из объемных конечных элементов.

Результаты. Значения изгибающих моментов, вычисленные аналитическим способом и при помощи твердотельной модели, имеют близкие значения. Максимальные отклонения компьютерного расчета от аналитического способа составляют от -3,2 до +2,6 %. Максимальные отклонения значений изгибающих моментов, полученных при сравнении твердотельной модели со стержневой, составляют от -9,2 до +4,0 %.

Выводы. Конечно-элементная модель, расчет которой основан на решении объемной задачи теории упругости, является эффективной верификационной моделью изучения сложных систем, но трудоемкой при ее создании и непростой при анализе полученных данных. Твердотельную модель можно рекомендовать для изучения отдельных конструкций или их критических зон.

Ключевые слова: железобетонные кессонные перекрытия, прямые кессоны, конечно-элементная модель, твердотельная объемная модель, изгибающие моменты, верификация

Для цитирования: Мозголов М.В., Козлова Е.В. Модель комплекса SCAD из объемных конечных элементов: расчет железобетонных кессонных перекрытий. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):18–36. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-18-36](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-18-36)

Вклад авторов

Мозголов М.В. – создание компьютерных моделей, сбор материала, обработка материала, научное редактирование статьи, оформление статьи.

Козлова Е.В. – сбор материала, обработка материала, аналитический расчет конструкций, оформление статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 31.01.2023

Поступила после рецензирования 07.02.2023

Принята к публикации 14.02.2023

SCAD MODEL OF SOLID FINITE ELEMENTS: CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE WAFFLE SLABS

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

E.V. KOZLOVA 

*Kolomna Institute (branch) of Moscow Polytechnic University, October Revolution str., 408, Kolomna,
140402, Russian Federation*

Abstract

Introduction. Current requirements for structural engineering oblige designers to use structures capable of resisting progressive collapse. Such structures include multiribbed reinforced concrete waffle slabs. Spatial systems are multiple indeterminate, their calculation is carried out in software systems based on the finite element method. Models of ribbed structures can be developed from different types of finite elements. The forces determined by different models can vary significantly, which is confirmed by the examples available in the literature.

Aim. To detect a simple and accurate finite element model for computer-aided calculating the ribbed reinforced concrete waffle slab.

Materials and methods. The study was carried out by comparing the bending moments obtained analytically and in the SCAD software by the finite element method for beams in waffle slabs of 12.0 × 18.0 m in plan with caissons of 1.5 × 2.25 m. The bar model consisting of a T-beam-and-girder construction and a solid model of bulk finite elements are calculated.

Results. The bending moments, calculated both analytically and using a solid model, have similar values. The maximum deviations of the computer calculation from the analytical method are from -3.2 to +2.6 %. The maximum deviations of the values of bending moments obtained when comparing the solid model with the bar model are from -9.2 to +4.0 %.

Conclusion. The finite element model, which is based on solving the volumetric problem of the elastic theory, is an effective verification model for studying complex systems; however, it is time-consuming and difficult for data analysis. A solid model can be recommended for studying individual structures or their critical zones.

Keywords: reinforced concrete waffle slabs, straight caissons, finite element model, solid model, bending moments, verification

For citation: Mozglov M.V., Kozlova E.V. SCAD model of solid finite elements: calculation of reinforced concrete waffle slabs. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):18–36. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-18-36](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-18-36)

Author contribution statements

Mozglov M.V. – computer model development, data collection, data processing, scientific editing, text preparation.

Kozlova E.V. – data collection, data processing, analytical calculation of structures, text preparation.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 31.01.2023

Revised 07.02.2023

Accepted 14.02.2023

Введение

Ребристые железобетонные конструкции перекрытий находят широкое применение в современном монолитном строительстве. Плиты, усиленные снизу монолитно связанными с ними балками, по сравнению с безбалочными конструкциями позволяют перекрывать большие пролеты, при наличии главных балок позволяют образовывать рамы несущего каркаса здания, придавать ему большую жесткость и устойчивость. Эффективной пространственно работающей конструкцией является часторебристое перекрытие кессонного типа. В качестве примера такой конструкции в Москве можно отметить павильон № 29 ВДНХ «Цветоводство и озеленение», построенный в 1969–1971 гг. В настоящее время в нашей стране при строительстве ребристых перекрытий получают распространение опалубочные системы Skydome, Holedeck, Победа и другие.

В связи с принятием норм СП 385.1325800.2018 «Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения» на проектирование зданий и сооружений нормального и повышенного уровней ответственности в целях их защиты от прогрессирующего обрушения пространственно работающие конструкции будут получать распространение [1]. Пространственные системы с точки зрения строительной механики являются многократно статически неопределимыми, и их расчет без использования современных компьютерных программ, основанных на методе конечных элементов (МКЭ), затруднителен или невозможен. Кроме этого, в соответствии с современными требованиями градостроительного законодательства (Градостроительный кодекс РФ от 29.12.2004 № 190-ФЗ [2], СП 333.1325800.2020 «Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на разных стадиях жизненного цикла» [3]) прочностной расчет строительных конструкций объектов, подлежащих экспертизе, в скором времени должен будет выполняться по BIM технологии путем создания цифровой информационной модели здания. В соответствии с ч. 12 ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» при проектировании объектов должен проводиться контроль качества проектной продукции, минимальные требования которого включают в себя проверку адекватности расчетных моделей, их точность, проведение параллельных расчетов с использованием независимо разработанных сертифицированных программных средств и другие требования [4]. Расчет на электронно-вычислительной машине (ЭВМ) осуществляется в программных комплексах, реализующих метод конечных элементов, при котором вычисленные в элементах усилия или напряжения могут оказаться недостоверными, и причин этому достаточно. Так, например, создав сетку

конечных элементов (КЭ) неверной густоты, расчетчик получит результат, значительно отличающийся от правильного [5–10].

Современные программные комплексы включают в себя широкий набор различных типов конечных элементов, из которых можно создать ребристую конечно-элементную модель (КЭМ). Авторами работ [7, 8] указывается, что «При составлении компьютерной модели комбинированных систем (плита, подпертая ребрами; плоские или пространственные рамно-связевые системы; плита, опирающаяся на вертикальные стержни и др.) могут возникнуть различные трудности». По состоянию на 2022 г. в работе [11] отмечается, что на современном этапе развития компьютерных расчетов при моделировании ребристых конструкций «До сих пор не предложена оптимальная расчетная схема, с одной стороны, обладающая достаточной простотой для проведения инженерного анализа, а с другой стороны, позволяющая с большой точностью отражать особенность работы элементов перекрытия». Имеющиеся в литературе данные расчета ребристых железобетонных конструкций показывают, что в зависимости от созданной конечно-элементной модели усилия в балках могут существенно отличаться [11–14]. Например, при расчете железобетонных кессонных перекрытий в моделях, в которых полка плиты задается оболочечными конечными элементами, а ребра стержневыми элементами, отнесенными от полки жесткой вставкой, максимальные отклонения усилий в балках, полученных методом конечных элементов от аналитического расчета, составляют: 50 [12], 40 [13], 22,1 % [14].

В работе [11] сравниваются продольные относительные деформации по высоте поперечного сечения балок, значения которых получены при помощи четырех конечно-элементных моделей расчета ребристой шарнирно опертой по контуру плиты $6,0 \times 12,0$ м. Первая модель представляет собой конструкцию, состоящую из стержневых конечных элементов – балок таврового сечения. Вторая модель состоит из оболочек, моделирующих плиту, и стержней, выполняющих функцию ребер. Соединение элементов выполнено абсолютно жесткими телами. В третьей модели как плита, так и ребра представлены оболочками, соединенными абсолютно жесткими телами. Четвертая модель выполнена в виде массивного тела, состоящего из объемных конечных элементов. В соответствии с выводом проведенного численного эксперимента наименьшие деформации получены в четвертой модели, состоящей из объемных конечных элементов и принятой автором за эталон. Наиболее близкой к четвертой модели оказалась самая простая первая модель, состоящая из стержней. Отклонения деформаций в растянутой зоне составляют +3,9 %, в сжатой +9,2 %. Наибольшие отклонения от четвертой модели показала вторая модель, в растянутой зоне расхождения составляют +72 %, в сжатой +75,3 %. Отклонения третьей модели в растянутой зоне +44,5 %, в сжатой +42,7 %.

Для обоснования надежности расчетов, созданных моделей метода конечных элементов, в п. 6 ГОСТ Р 57700.10-2018 «Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области» [15] перечислены требования к порядку верификации и валидации расчетной модели для численного моделирования в упругой области напряженно-деформированного состояния (НДС) сложных элементов конструкций. Одним из методов контроля полученных данных по МКЭ является расчет конструкции при помощи разных моделей.

Данная работа является продолжением изучения аналитического метода расчета прямых кессонных железобетонных перекрытий и их моделирования в вычислительном

комплексе SCAD [16, 17]. Ранее рассматривались стержневые конечно-элементные модели, которые обладают как достоинствами, так и недостатками [14, 17]. Известный аналитический метод расчета кессонных перекрытий уточнен, в формулы определения составляющих общей нагрузки, приходящиеся на ортогональные балки, введены жесткости. Стержневые конечно-элементные модели показали хорошую сходимость с уточненным аналитическим методом расчета, однако есть предположение, что данные модели не в полной мере учитывают пространственную работу кессонной конструкции. В работах [11, 18, 19] при расчете железобетонных конструкций рассматриваются пространственные конечно-элементные модели, состоящие из объемных, плоских и линейных элементов. Отмечается, что при помощи моделей, решение которых основано на объемной задаче теории упругости, получается близкая к действительности картина НДС. В работе [21] при анализе причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк» отмечается, что критические зоны стыковки ребер и скорлупы необходимо изучать на объемных бетонных элементах, а тестовые расчеты показали адекватность объемной модели даже при одном слое элементов по толщине. В то же время объемные модели характеризуются высокой трудоемкостью их создания, большой размерностью задачи и сложностью анализа полученного результата [6, 11, 18, 19].

Методика выполнения работы предусматривает сравнение усилий – изгибающих моментов, полученных уточненным аналитическим способом, с учетом пролетов, жесткости конструкции и методом конечных элементов в вычислительном комплексе SCAD во всех пролетных балках кессонного перекрытия размером в плане $12,0 \times 18,0$ м с кессонами $1,5 \times 2,25$ м (по осям).

Цель

Целью работы является поиск простой и наиболее точной конечно-элементной модели для расчета ребристого железобетонного кессонного перекрытия, а также выявление теоретических резервов несущей способности по изгибающему моменту у стержневой модели при сравнении ее с объемной моделью.

Материалы и методы исследования

За основу численного эксперимента принята конструкция кессонного перекрытия размером в плане ($L_x \times L_y$) $12,0 \times 18,0$ м с кессонами $1,5 \times 2,25$ м (по осям) (рис. 1) как наиболее сложная для аналитического расчета, данные которой частично представлены в работе [17]. Высота перекрытия составляет 500 мм, толщина полки – 80 мм, ширина ребер балок – 250 мм. Конструкция запроектирована из бетона класса В25.

Выполним аналитический расчет в соответствии с теорией, учитывающей пролеты конструкции L_x и L_y , относительную жесткость балок D_x и D_y . Жесткость балок B_x и B_y определена в вычислительном комплексе SCAD. Рассматриваем пролетные балки B_{1x} , B_{2x} , B_{3x} , B_{4x} , B_{1y} , B_{2y} , B_{3y} , B_{4y} (рис. 1).

В соответствии с требованиями п. 6.2.5 СП. 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования» [20] и п. 2.1.1.1 Методического пособия [22] для учета ползучести бетона и наличия трещин, как и в работе [17], начальный модуль

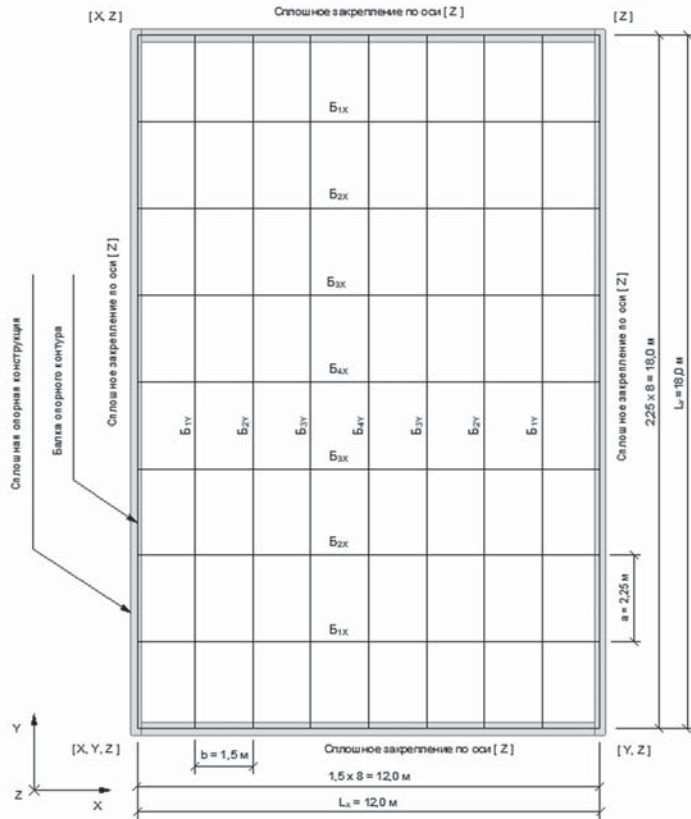


Рис. 1. Схема кессонного перекрытия размером в плане 12,0 × 18,0 м с кессонами 1,5 × 2,25 м.

$B_{1X}, B_{2X}, B_{3X}, B_{4X}, B_{1Y}, B_{2Y}, B_{3Y}, B_{4Y}$ – рассчитываемые балки; $[X, Y, Z]$ – связи, установленные в узлах балки опорного контура

Fig. 1. Schematic of a waffle slab of 12.0 x 18.0 m in plan having 1.5 x 2.25 m caissons. $B_{1X}, B_{2X}, B_{3X}, B_{4X}, B_{1Y}, B_{2Y}, B_{3Y}, B_{4Y}$ – calculated beams; $[X, Y, Z]$ – connections established in beam nodes of supporting structure

упругости бетона умножался на коэффициент 0,2 для участков с трещинами (пролетные участки) и 0,3 для участков без трещин (опорный контур размером $0,25 \times 0,5(h)$ м).

Максимальные изгибающие моменты в балках, расположенных вдоль осей X и Y , определяются по формулам:

$$M_x^{max} = \alpha_1 \times q_x \times a \times L_x^2 \times n_x, \quad (1)$$

$$M_y^{max} = \alpha_2 \times q_y \times b \times L_y^2 \times n_y, \quad (2)$$

где α_1 и α_2 – коэффициенты, зависящие от характера распределения нагрузки и вида опорных закреплений. При равномерно распределенной нагрузке на перекрытие и шарнирно опертом контуре $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,125$; a и b – шаг балок; n_x и n_y – коэффициенты пропорциональности, зависящие от расположения балок в перекрытии.

Составляющие общей нагрузки, приходящиеся на балки $q_x + q_y = q$, расположенные вдоль осей X и Y , зависят от размеров пролетов перекрытия L_x и L_y и относительной жесткости

D_x и D_y отдельных центральных ортогональных балок, равноотстоящих друг от друга с жесткостью B_x и B_y .

$$B_x = E \times I_x, \quad (3)$$

$$B_y = E \times I_y, \quad (4)$$

где E – модуль упругости материала;

I_x и I_y – моменты инерции балок вдоль осей X и Y .

$$q_x = q \times \frac{L_y^4 \times D_x}{L_x^4 \times D_y + L_y^4 \times D_x}, \quad (5)$$

$$q_y = q \times \frac{L_x^4 \times D_y}{L_x^4 \times D_y + L_y^4 \times D_x}. \quad (6)$$

Относительная жесткость балок с учетом коэффициентов редуцирования:

$$D_x = \frac{B_x}{a} = \frac{0,2 \times E_b \times I_x}{2,25} = \frac{3540}{2,25} = 1573 \text{ Тм}, \quad (7)$$

$$D_y = \frac{B_y}{b} = \frac{0,2 \times E_b \times I_y}{1,5} = \frac{3125}{1,5} = 2083 \text{ Тм}, \quad (8)$$

где B_x и B_y – жесткость при изгибе каждой из балок вдоль осей X и Y ;
 a и b – шаг балок.

Составляющие общей нагрузки, приходящиеся на балки:

$$q_x = q \times \frac{L_y^4 \times D_x}{L_x^4 \times D_y + L_y^4 \times D_x} = 1 \times \frac{18^4 \times 1573}{12^4 \times 2083 + 18^4 \times 1573} = 0,793 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2}, \quad (9)$$

$$q_y = q \times \frac{L_x^4 \times D_y}{L_x^4 \times D_y + L_y^4 \times D_x} = 1 \times \frac{12^4 \times 2083}{12^4 \times 2083 + 18^4 \times 1573} = 0,207 \frac{\text{Т}}{\text{м}^2}, \quad (10)$$

Балка B_{1X}

Коэффициент пропорциональности, учитывающий расположение балки B_{1X} от опорного контура вдоль оси Y .

$$\eta_y = \frac{y}{L_y} = \frac{2,25}{18} = 0,125, \quad (11)$$

$$n_x = \frac{16}{5} \times (\eta_y - 2 \times \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \times (0,125 - 2 \times 0,125^3 + 0,125^4) = 0,388, \quad (12)$$

Пролетный изгибающий момент

$$M_{b1x}^{max} = \alpha \times q_x \times a \times L_x^2 \times n_x = 0,125 \times 0,793 \times 2,25 \times 12^2 \times 0,388 = 12,47 \text{ Тм}. \quad (13)$$

Балка B_{2X}

$$\eta_y = \frac{y}{L_y} = \frac{4,5}{18} = 0,25, \quad (14)$$

$$n_x = \frac{16}{5} \times (\eta_y - 2 \times \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \times (0,25 - 2 \times 0,25^3 + 0,25^4) = 0,713, \quad (15)$$

$$M_{Б2x}^{max} = \alpha \times q_x \times a \times L_x^2 \times n_x = 0,125 \times 0,793 \times 2,25 \times 12^2 \times 0,713 = 22,89 \text{ Тм.} \quad (16)$$

Балка Б_{3X}

$$\eta_y = \frac{y}{L_y} = \frac{6,75}{18} = 0,375, \quad (17)$$

$$n_x = \frac{16}{5} \times (\eta_y - 2 \times \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \times (0,375 - 2 \times 0,375^3 + 0,375^4) = 0,926, \quad (18)$$

$$M_{Б3x}^{max} = \alpha \times q_x \times a \times L_x^2 \times n_x = 0,125 \times 0,793 \times 2,25 \times 12^2 \times 0,926 = 29,74 \text{ Тм.} \quad (19)$$

Балка Б_{4X}

$$M_{Б4x}^{max} = \alpha \times q_x \times a \times L_x^2 \times n_x = 0,125 \times 0,793 \times 2,25 \times 12^2 \times 1 = 32,12 \text{ Тм.} \quad (20)$$

Балка Б_{1Y}

Коэффициент пропорциональности, учитывающий расположение балки Б_{1Y} от опорного контура вдоль оси X.

$$\eta_x = \frac{x}{L_x} = \frac{1,5}{12} = 0,125, \quad (21)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \times (\eta_x - 2 \times \eta_x^3 + \eta_x^4) = \frac{16}{5} \times (0,125 - 2 \times 0,125^3 + 0,125^4) = 0,388, \quad (22)$$

$$M_{Б1y}^{max} = \alpha \times q_y \times b \times L_y^2 \times n_y = 0,125 \times 0,207 \times 1,5 \times 18^2 \times 0,388 = 4,88 \text{ Тм.} \quad (23)$$

Балка Б_{2Y}

$$\eta_x = \frac{x}{L_x} = \frac{3,0}{12} = 0,25, \quad (24)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \times (\eta_x - 2 \times \eta_x^3 + \eta_x^4) = \frac{16}{5} \times (0,25 - 2 \times 0,25^3 + 0,25^4) = 0,713, \quad (25)$$

$$M_{Б2y}^{max} = \alpha \times q_y \times b \times L_y^2 \times n_y = 0,125 \times 0,207 \times 1,5 \times 18^2 \times 0,713 = 8,96 \text{ Тм.} \quad (26)$$

Балка Б_{3Y}

$$\eta_x = \frac{x}{L_x} = \frac{4,5}{12} = 0,375, \quad (27)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \times (\eta_x - 2 \times \eta_x^3 + \eta_x^4) = \frac{16}{5} \times (0,375 - 2 \times 0,375^3 + 0,375^4) = 0,926, \quad (28)$$

$$M_{Б3y}^{max} = \alpha \times q_y \times b \times L_y^2 \times n_y = 0,125 \times 0,207 \times 1,5 \times 18^2 \times 0,926 = 11,65 \text{ Тм.} \quad (29)$$

Балка B_{4y}

$$M_{B_{4y}}^{max} = \alpha \times q_y \times b \times L_y^2 \times n_y = 0,125 \times 0,207 \times 1,5 \times 18^2 \times 1 = 12,58 \text{ Тм.} \quad (30)$$

Результаты аналитического расчета представлены в табл. 2.

Выполним расчет конструкции на ЭВМ в вычислительном комплексе SCAD в линейной постановке задачи как основного исследовательского инструмента строительной механики [23], но с учетом коэффициентов редуцирования начального модуля упругости бетона, учитывающих его ползучесть и трещинообразование [22].

Для создания необходимой густоты сетки конечных элементов твердотельной модели обратим внимание на ряд требований технических норм и рекомендаций специалистов по МКЭ. В соответствии с пп. 5.3.1, 5.3.3 ГОСТ Р 57700.10-2018 «Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области» не допускается при генерации КЭМ с применением твердотельных элементов использовать для тонкостенных конструкций менее трех элементов по толщине, нежелательно использовать тетраэдральные элементы первого порядка при проведении численного моделирования в 3D-постановке [15]. Точность расчета зависит не только от типа конечного элемента, но и от способа расположения конечных элементов и их ориентации по отношению к потокам основных напряжений [5]. При назначении расчетной сетки предпочтение нужно отдавать равносторонним элементам (равносторонний треугольник, квадрат, равносторонний тетраэдр, куб) [6–10]. Если не получается оптимальное разбиение, то для четырехугольных элементов следует ограничить их стремление к «игольчатой форме». Вытянутость четырехугольников рекомендуется ограничить в пределах 0,25–1, а рекомендуемый коэффициент формы должен быть 1–4 [10].

Выполняя данные рекомендации, в «ручном» режиме для объемной модели создана регулярная сетка конечных элементов из пространственного изопараметрического восьмиузлового конечного элемента № 36 с местными осями X_1 , Y_1 , Z_1 , совпадающими с глобальной системой координат X , Y , Z . Полка по высоте разбита на три параллелепипеда размером $41,667(x_1) \times 41,667(y_1) \times 26,667(z_1)$ мм. Ребра состоят из элементов размером $41,667(x_1) \times 41,667(y_1) \times 42(z_1)$ мм. Равномерно распределенная нагрузка $q = 1 \text{ Т/м}^2$ прикладывалась двумя способами: на верхнюю полку конструкции и к нижней грани балок. В первом случае сверху полки по объемным элементам уложена «пленка» из оболочечных конечных элементов КЭ № 41 толщиной 1 мм и размером в плане $41,667 \times 41,667$ мм с физико-механическими характеристиками, соответствующими бетону конструкции. Во втором случае аналогичная «пленка», работающая по биссектрисной схеме излома, прикреплялась к нижней грани балок [24]. При расчете конструкции в протоколе выполнения расчета уведомление о геометрически изменяемой системе отсутствовало. 3D-модель представлена на рис. 2.

Для объемной модели, состоящей только из одного материала, в нашем случае бетона, величины изгибающих моментов $M_{B_{i,x}}$, $M_{B_{i,y}}$ в балках, расположенных вдоль осей X и Y , определяются следующим образом [19, с. 257].

$$M_{B_{i,x}} = I_x \times \frac{\sigma_{xbt,max} - \sigma_{xbc,max}}{h}, \quad (31)$$

$$M_{Bi,y} = I_y \times \frac{\sigma_{ybt,max} - \sigma_{ybc,max}}{h}, \quad (32)$$

$$\sigma_{xbt,max} = \frac{\sigma_{xbt,max,1} + \sigma_{xbt,max,2} + \dots + \sigma_{xbt,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{xbt,max,i}}{n}, \quad (33)$$

$$\sigma_{ybt,max} = \frac{\sigma_{ybt,max,1} + \sigma_{ybt,max,2} + \dots + \sigma_{ybt,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ybt,max,i}}{n}, \quad (34)$$

$$\sigma_{xbc,max} = \frac{\sigma_{xbc,max,1} + \sigma_{xbc,max,2} + \dots + \sigma_{xbc,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{xbc,max,i}}{n}, \quad (35)$$

$$\sigma_{ybc,max} = \frac{\sigma_{ybc,max,1} + \sigma_{ybc,max,2} + \dots + \sigma_{ybc,max,n}}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{\sigma_{ybc,max,i}}{n}, \quad (36)$$

где I_x и I_y – моменты инерции балок;

h – высота конструкции;

n – количество анализируемых конечных элементов;

$\sigma_{xbt,max}$ и $\sigma_{ybt,max}$ – усредненные максимальные напряжения растяжения в нижней крайней фибре бетона;

$\sigma_{xbc,max}$ и $\sigma_{ybc,max}$ – усредненные максимальные напряжения сжатия в верхней крайней фибре бетона.

Важным является выбор анализируемого поперечного сечения балок, так как в местах их пересечения имеет место значительный разброс величин напряжений. Стабильность напряжений можно выявить по изолиниям напряжений (рис. 3). Определив необходимое поперечное сечение, начинаем изучать интересующие нас напряжения с максимальным значением во всех конечных элементах нижней, а затем верхней зон балок (рис. 4–9). В случае приложения нагрузки на верхнюю полку конструкции напряжения в консольных участках тавровых балок увеличиваются. Это связано с суммированием напряжений, возникающих от изгиба балок и изгиба полки, опирающейся на ребра. Анализ НДС полки должен включать в себя комбинации загрузок (по всей площади, в четных пролетах, в нечетных пролетах, в шахматном порядке, смежные пролеты и др.). В случае отсутствия в анализируемом месте нагрузки на полку напряжения от ее изгиба по причине многопролетности полки могут оказаться другого знака. Поэтому мы должны учитывать в расчете только напряжения от изгиба балок. Для определения напряжений по сечению тавров без учета изгиба полок применялся второй вариант приложения нагрузки к нижним поверхностям балок (рис. 8, 9). Сравнение полученных данных позволило сделать вывод, что в сжатой зоне над ребрами балок напряжения по первой и второй схемам загрузок близки друг другу. При второй схеме загрузок в консольных участках тавров напряжения изменяются, к середине пролета конструкции увеличиваются, к опоре уменьшаются, но их среднее арифметическое значение примерно равно напряжениям над ребрами балок. Эти значения мы используем в расчете. Усредненные максимальные величины напряжений в верхних и нижних фибрах бетона балок представлены в табл. 1.

Определение изгибающих моментов в балках. Моменты инерции I_x и I_y определены в стержневой конечно-элементной модели ВК SCAD работы [17].

Балка, расположенная вдоль оси X : $I_x = 578\,423,68 \text{ см}^4$.

Балка, расположенная вдоль оси Y : $I_y = 510\,750 \text{ см}^4$.

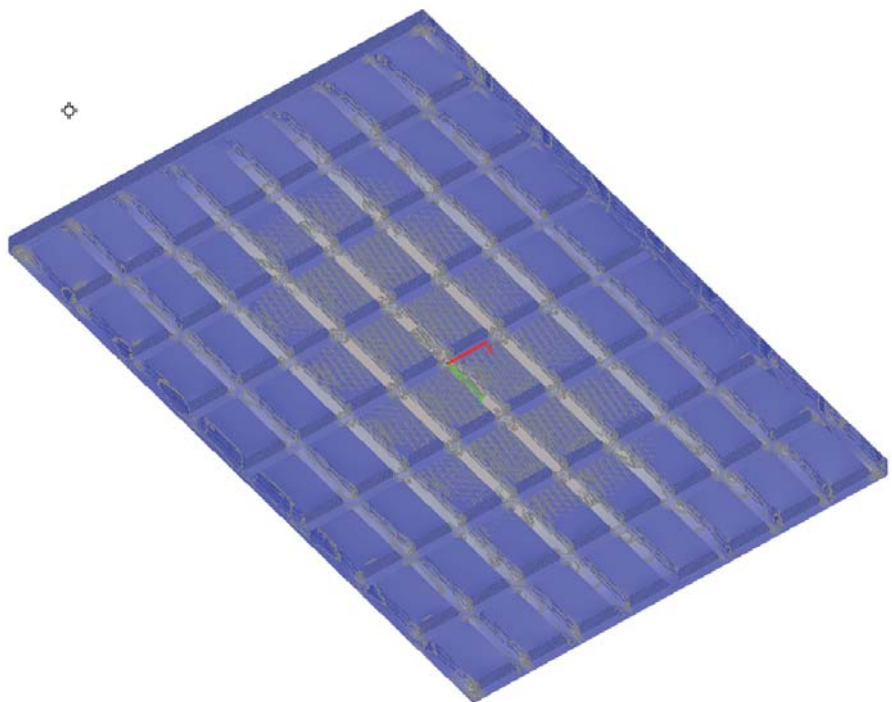


Рис. 2. Конечно-элементная модель, вид снизу. Поля напряжений σ_y
Fig. 2. Finite element model, bottom view. Stress fields σ_y

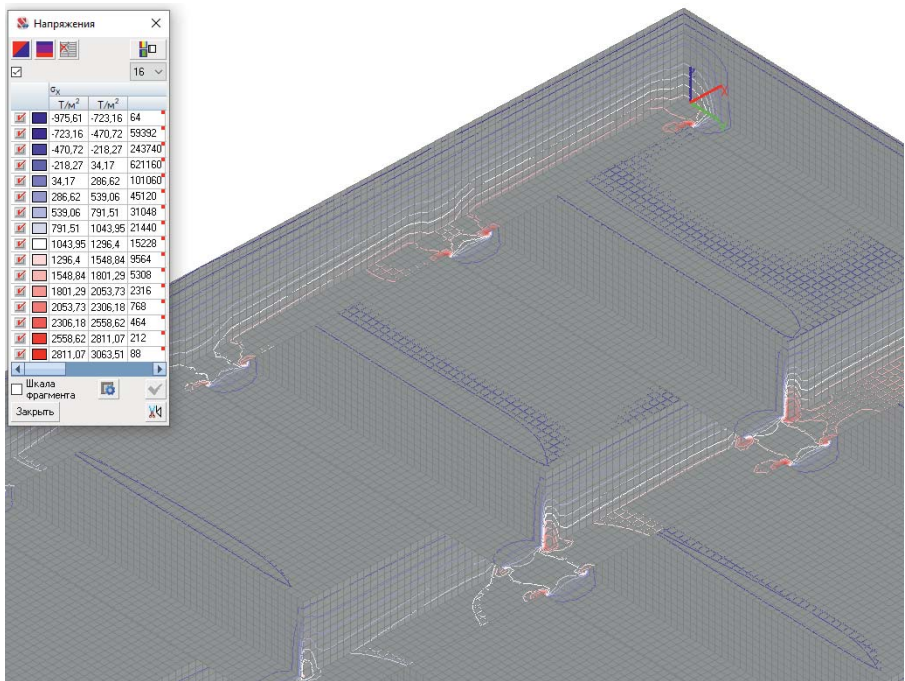


Рис. 3. Фрагмент центральной части перекрытия, вид снизу. Изолинии σ_x
Fig. 3. Central part of the floor system, bottom view. Contour lines σ_x

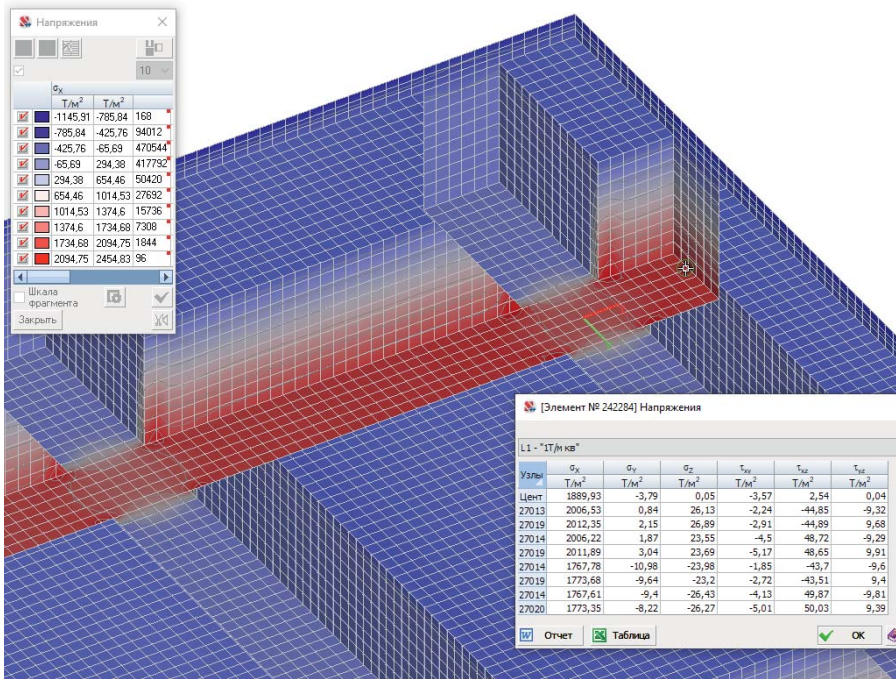


Рис. 4. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_x . Напряжения в нижней зоне балки B_{4x}
 Fig. 4. Central part of the floor system. Stress fields σ_x . Stresses in the lower part of the beam B_{4x}

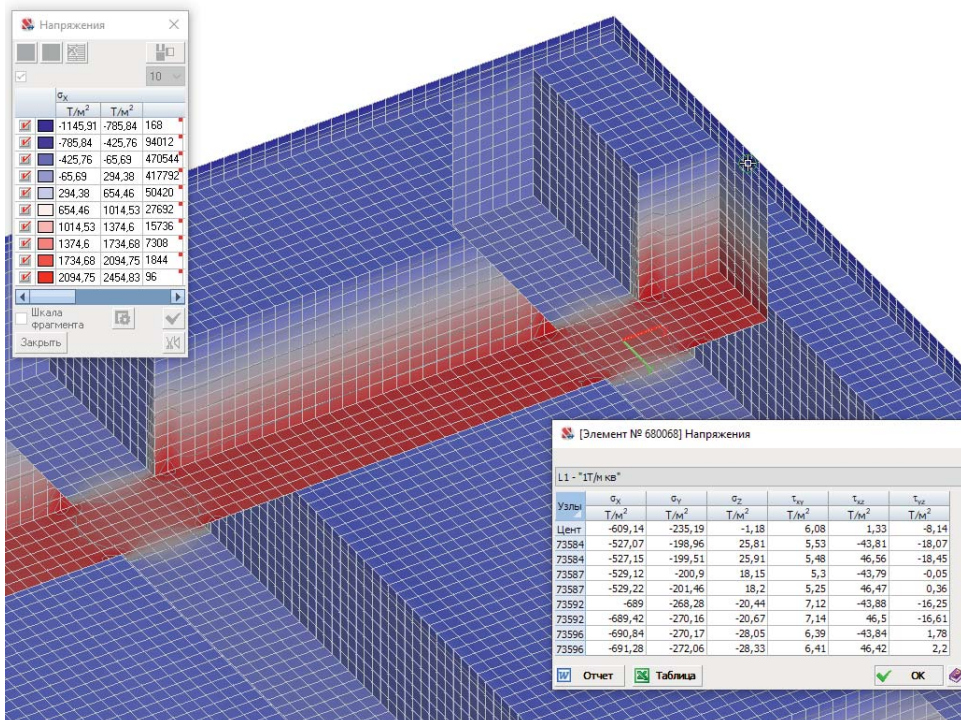


Рис. 5. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_x . Напряжения в верхней зоне балки B_{4x}
 Fig. 5. Central part of the floor system. Stress fields σ_x . Stresses in the upper part of the beam B_{4x}

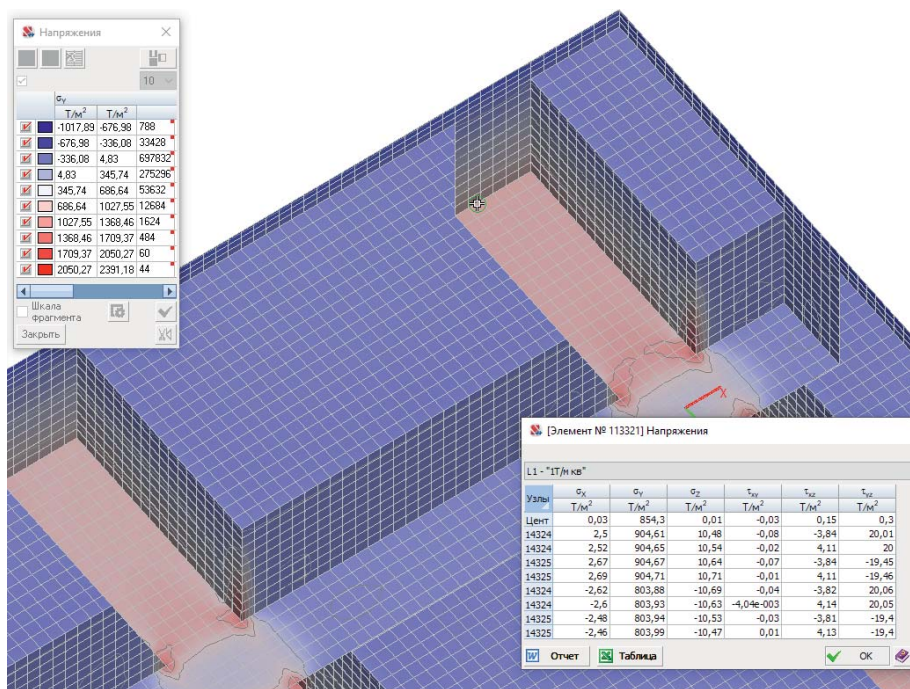


Рис. 6. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_y . Напряжения в нижней зоне балки B_{4y}
Fig. 6. Central part of the floor system. Stress fields σ_y . Stresses in the lower part of the beam B_{4y}

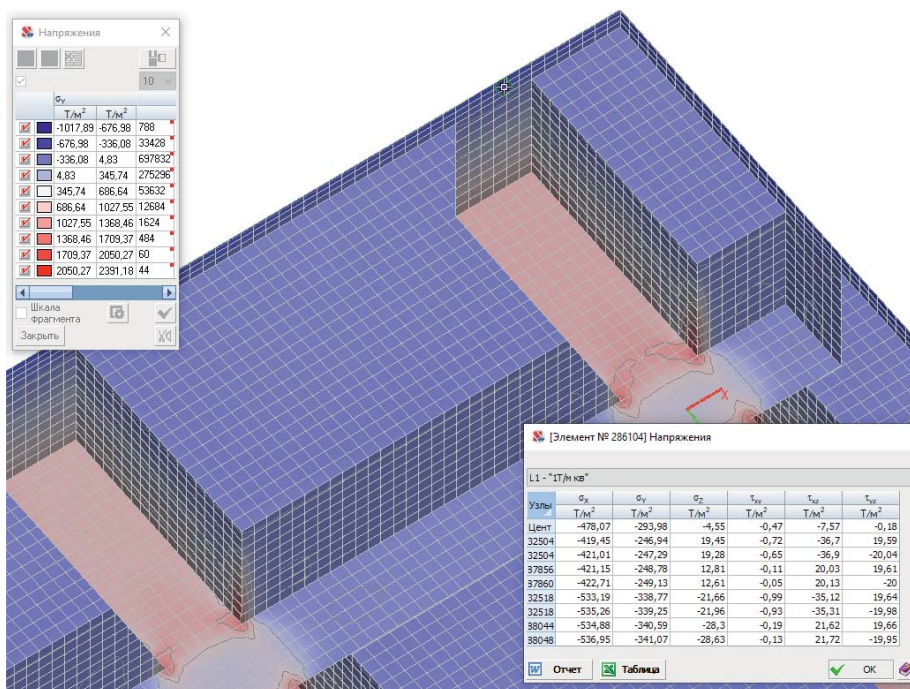


Рис. 7. Фрагмент центральной части перекрытия. Поля напряжений σ_y . Напряжения в верхней зоне балки B_{4y}
Fig. 7. Central part of the floor system. Stress fields σ_y . Stresses in the upper part of the beam B_{4y}

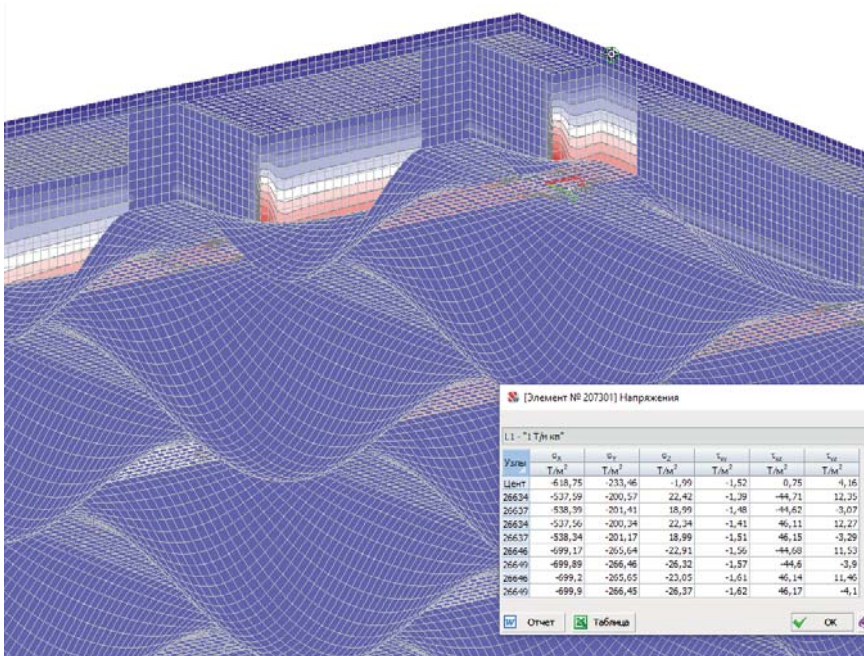


Рис. 8. Фрагмент центральной части перекрытия. Вторая схема приложения нагрузки. Поля напряжений σ_x .

Напряжения в верхней зоне балки B_{4x}

Fig. 8. Central part of the floor system. Second load application diagram Stress fields σ_x . Stresses in the upper part of the beam B_{4x}

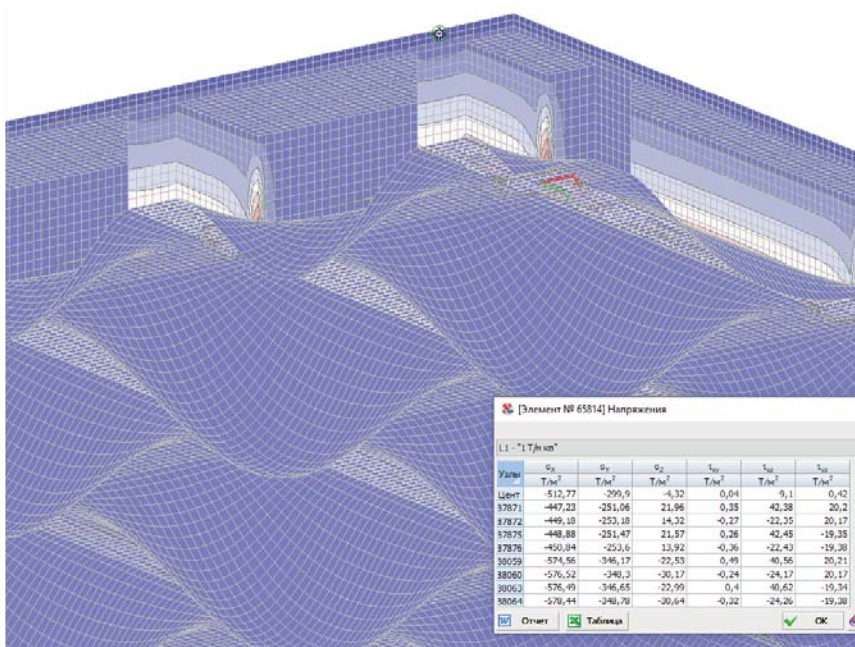


Рис. 9. Фрагмент центральной части перекрытия. Вторая схема приложения нагрузки. Поля напряжений σ_y .

Напряжения в верхней зоне балки B_{4y}

Fig. 9. Central part of the floor system. Second load application diagram Stress fields σ_y . Stresses in the upper part of the beam B_{4y}

Таблица 1
Усредненные максимальные напряжения по верхней и нижней граням балок

Table 1
Average maximum stresses on the upper and lower sides of the beams

Место поперечного сечения балки	Усредненные максимальные напряжения, Т/м ²							
	Балка							
	Б _{1х}	Б _{2х}	Б _{3х}	Б _{4х}	Б _{1у}	Б _{2у}	Б _{3у}	Б _{4у}
Верхняя зона	-306	-510	-645	-690	-195	-270	-320	-343
Нижняя зона	800	1465	1866	2000	295	625	835	900

Балка Б_{1х}

$$M_{Б1х} = I_x \times \frac{\sigma_{хbt,max} - \sigma_{хbc,max}}{h} = \frac{578423,68}{10^8} \times \frac{800 + 306}{0,5} = 12,8 \text{ Тм}, \tag{37}$$

Балка Б_{2х}

$$M_{Б2х} = I_x \times \frac{\sigma_{хbt,max} - \sigma_{хbc,max}}{h} = \frac{578423,68}{10^8} \times \frac{1465 + 510}{0,5} = 22,85 \text{ Тм}, \tag{38}$$

Балка Б_{3х}

$$M_{Б3х} = I_x \times \frac{\sigma_{хbt,max} - \sigma_{хbc,max}}{h} = \frac{578423,68}{10^8} \times \frac{1866 + 645}{0,5} = 29,05 \text{ Тм}, \tag{39}$$

Балка Б_{4х}

$$M_{Б4х} = I_x \times \frac{\sigma_{хbt,max} - \sigma_{хbc,max}}{h} = \frac{578423,68}{10^8} \times \frac{2000 + 690}{0,5} = 31,1 \text{ Тм}, \tag{40}$$

Балка Б_{1у}

$$M_{Б1у} = I_y \times \frac{\sigma_{ybt,max} - \sigma_{ybc,max}}{h} = \frac{510750}{10^8} \times \frac{295 + 195}{0,5} = 5,0 \text{ Тм}, \tag{41}$$

Балка Б_{2у}

$$M_{Б2у} = I_y \times \frac{\sigma_{ybt,max} - \sigma_{ybc,max}}{h} = \frac{510750}{10^8} \times \frac{625 + 270}{0,5} = 9,14 \text{ Тм}, \tag{42}$$

Балка Б_{3у}

$$M_{Б3у} = I_y \times \frac{\sigma_{ybt,max} - \sigma_{ybc,max}}{h} = \frac{510750}{10^8} \times \frac{835 + 320}{0,5} = 11,8 \text{ Тм}, \tag{43}$$

Балка Б_{4у}

$$M_{Б4у} = I_y \times \frac{\sigma_{ybt,max} - \sigma_{ybc,max}}{h} = \frac{510750}{10^8} \times \frac{900 + 343}{0,5} = 12,7 \text{ Тм}. \tag{44}$$

Прогиб центра перекрытия стержневой конечно-элементной модели составил $f = 144$ мм, модели из объемных КЭ $f = 125$ мм, что можно объяснить влиянием жесткости мест пересечения балок. В стержневой модели это можно учесть, установив в узлы балок жесткие вставки.

Данные аналитического расчета и компьютерных моделей представлены в табл. 2.

Результаты

Таблица 2

Сравнение значений изгибающих моментов в балках кессонного перекрытия ($L_x \times L_y$) $12,0 \times 18,0$ м с кессонами $1,5 \times 2,25$ м (в осях), полученные аналитическим методом и при помощи компьютерных моделей вычислительного комплекса SCAD

Table 2

Comparison of bending moment in central beams of a waffle slab of ($L_x \times L_y$) 12.0×18.0 m in plan with caissons of 1.5×2.25 m (in axes), obtained by analytical method and computer-aided calculations using SCAD software

Метод расчета	Изгибающие моменты, М, Тм							
	Балка							
	B_{1x}	B_{2x}	B_{3x}	B_{4x}	B_{1y}	B_{2y}	B_{3y}	B_{4y}
Аналитический [17]	12,47 100 %	22,89 100 %	29,74 100 %	32,12 100 %	4,88 100 %	8,96 100 %	11,65 100 %	12,58 100 %
SCAD Балочная модель [17] Тавровые балки – пространственный стержень Тип КЭ № 5	13,32 106,8 %	24,58 107,4 %	31,8 106,9 %	34,24 106,6 %	4,88 100 %	8,79 98,1 %	11,42 98,0 %	12,34 98,1 %
SCAD Объемная модель из пространственного изопараметрического восьмиузлового конечного элемента Тип КЭ № 36	12,8 102,6 %	22,85 99,8 %	29,05 97,7 %	31,1 96,8 %	5,0 102,5 %	9,14 102 %	11,8 101,3 %	12,7 100,9 %

Выводы

1. Значения изгибающих моментов в балках шарнирно опертого по контуру перекрытия прямоугольного в плане с прямоугольными кессонами, вычисленные аналитическим способом с учетом величин пролетов, относительной жесткости балок и методом конечных элементов вычислительного комплекса SCAD при помощи модели решения пространственной задачи теории упругости, состоящей из объемных конечных элементов, имеют близкие значения. Максимальные отклонения метода конечных элементов от аналитического способа расчета составляют от -3,2 до +2,6 %.

2. Значения изгибающих моментов в балках шарнирно опертого по контуру перекрытия прямоугольного в плане с прямоугольными кессонами, вычисленные методом конечных элементов вычислительного комплекса SCAD при помощи модели, состоящей из объемных конечных элементов и стержневой модели, имеют близкие значения. Максимальные отклонения объемной модели от стержневой составляют от -9,2 до +4,0 %. Теоретических запасов несущей способности по изгибающему моменту у стержневой конечно-элементной модели не выявлено. Имеющиеся отклонения значений изгибающих моментов двух

моделей можно объяснить математическими особенностями расчетов метода конечных элементов.

3. Конечно-элементная модель, расчет которой основан на решении объемной задачи теории упругости, является эффективной верификационной моделью изучения сложных систем, но трудоемкой при ее создании и непростой при анализе полученных данных. Модель, состоящую из объемных (бетон) и линейных (арматура) конечных элементов, можно использовать в структурном анализе с учетом наличия фактического армирования конструкции. Однако это можно рекомендовать только для изучения отдельных конструкций или их критических зон.

4. В связи с наличием как у стержневой, так и у объемной моделей не только достоинств, но и недостатков дальнейшим исследованием расчета прямых шарнирно-опертых по контуру кессонных железобетонных перекрытий может быть моделирование конструкций на ЭВМ с использованием других типов конечных элементов, например плитных (оболочечных), моделирующих полку, и стержневых, моделирующих ребро, соединенных жесткой вставкой. Сравнивать полученные данные необходимо с уточненным аналитическим методом расчета, учитывающим как пролеты, так и жесткость конструкции.

Список литературы

1. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2018.
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации: 29 дек. 2004 г., № 190-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=443205>
3. СП 333.1325800.2020. Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на разных стадиях жизненного цикла [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573514520>
4. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2015.
5. Карпиловский В.С., Криксунов Э.З., Маляренко А.А., Фиалко С.Ю., Перельмутер А.В., Перельмутер М.А. SCAD Office. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD ++. Москва: Изд-во «СКАД СОФТ»; 2015.
6. Секулович М. Метод конечных элементов. Москва: Стройиздат; 1993.
7. Городецкий А.С., Евзеров И.Д. Компьютерные модели конструкций. Киев: Факт; 2005.
8. Городецкий А.С., Барабаш М.С., Сидоров В.Н. Компьютерное моделирование в задачах строительной механики. Москва: АСВ; 2016.
9. Перельмутер А.В., Сливкер В.И. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа. Москва: ДМК Пресс; 2007.
10. Перельмутер А.В. Беседы о строительной механике. Москва: Издательство SCAD Soft, Издательский дом АСВ; 2016.
11. Никитин К.Е., Кирсанов О.А. Сравнительное исследование конечно-элементных методик расчета ребристых железобетонных перекрытий. Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2022;18(3):242–254. <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-242-254>
12. Малахова А.Н. Монолитные кессонные перекрытия зданий. Вестник МГСУ. 2013;{1}:79–86.
13. Шибяева В.Д. Исследование напряженно-деформированного состояния монолитных кессонных перекрытий. Молодой ученый. 2021;{16 часть II}:119–123.
14. Мозголов М.В., Козлова Е.В. Верификация моделей SCAD железобетонного кессонного перекрытия на основе аналитического метода расчета, учитывающего пролеты и жесткость конструкции. Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2023;8(2):29–40. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40>
15. ГОСТ Р 57700.10-2018. Численное моделирование физических процессов. Определение напряженно-деформированного состояния. Верификация и валидация численных моделей сложных элементов конструкций в упругой области. Москва: Стандартинформ; 2018.

16. Мозголов М.В., Козлова Е.В. О применении жесткостей аналитического метода расчета прямых железобетонных кессонных перекрытий. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;33(2):122–138. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-122-138](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-122-138)
17. Мозголов М.В., Козлова Е.В. О применении жесткостей аналитического метода расчета прямых железобетонных кессонных перекрытий. Часть 2. Расчет с относительной жесткостью балок. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;35(4):62–79. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-62-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-62-79)
18. Алямовский А.А. Инженерные расчеты в SolidWorks Simulation. Москва: ДМК Пресс; 2019.
19. Пекин Д.А. Плитная сталежелезобетонная конструкция. Москва: АСВ; 2010.
20. СП 430.1325800.2018. Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2019.
21. Белостоцкий А.М., Дубинский С.И. Анализ причин обрушения конструкций покрытия СОК «Трансвааль-парк». Ansys Solutions. Русская редакция [интернет]. 2007 Зима: 5–12. Режим доступа: <https://scadsoft.com/download/Transvaal.pdf>
22. Плоские безбалочные железобетонные перекрытия [интернет]. Москва; 2017. Режим доступа: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf
23. Перельмутер А.В., Тир В.В. Готовы ли мы перейти к нелинейному анализу при проектировании? International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017;13(3):86–102. <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102>
24. Мозголов М.В., Козлова Е.В. К вопросу создания верификационной модели для расчета кессонного железобетонного перекрытия в вычислительном комплексе SCAD. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;32(1):128–140. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

References

1. SP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
2. Urban Planning Code of the Russian Federation: 29 december 2004, No 190-FZ [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=443205>. (In Russian).
3. SP 333.1325800.2020. Building information modeling. Modeling guidelines for various project life cycle stages [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/573514520>. (In Russian).
4. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
5. Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Fialko S.Yu., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A. SCAD Office. Version 21. The SCAD ++computing complex. Moscow: SKAD SOFT Publ.; 2015. (In Russian).
6. Sekulovich M. Finite element method. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1993. (In Russian).
7. Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D. Computer models of structures. Kyiv: Fakt Publ.; 2005. (In Russian).
8. Gorodetskiy A.S., Barabash M.S., Sidorov V.N. Computer modeling in tasks of constructions. Moscow: ASV Publ.; 2016. (In Russian).
9. Perel'muter A.V., Slivker V.I. Design models of structures and the possibility of their analysis. Moscow: DMK Press Publ.; 2007. (In Russian).
10. Perel'muter A.V. Conversations about construction mechanics. Moscow: SCAD Soft Publ., ASV Publ.; 2016. (In Russian).
11. Nikitin K.E., Kirsanov O.A. Comparative study of finite element methods of calculation of ribbed reinforced concrete floors. Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. 2022;18(3):242–254. (In Russian). <https://doi.org/10.22363/1815-5235-2022-18-3-242-254>
12. Malakhova A.N. Monolithic caisson floors of buildings. Vestnik MGSU = Monthly Journal on Construction and Architecture. 2013;(1):79–86. (In Russian).
13. Shibaeva V.D. Investigation of the stress-strain state of monolithic coffered ceilings. Molodoi uchenyi = Young Scientist. 2021;(16):119–123. (In Russian).
14. Mozgolov M.V., Kozlova E.V. Verification of SCAD models of reinforced concrete caisson floor on the basis of an analytical calculation method that takes into account spans and rigidity of the structure. Bulletin of Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2023;8(2):29–40. (In Russian). <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2022-8-2-29-40>
15. State Standard R 57700.10-2018. Numerical modeling of physical processes. Determination of stress-strain state. Verification and validation of numerical models of complex structural elements in the elastic region. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
16. Mozgolov M.V., Kozlova E.V. Use of analytical method for calculating stiffnesses of straight waffle slabs. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;33(2):122–138. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-122-138](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-122-138)

17. *Mozgolov M.V., Kozlova E.V.* Use of analytical method for calculating stiffnesses of straight waffle slabs. Part 2. Calculation using relative stiffness of beams. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;35(4):62–79. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4\(35\)-62-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-62-79)
18. *Alyamovskiy A.A.* Engineering calculations in SolidWorks Simulation. Moscow: DMK Press Publ.; 2019. (In Russian).
19. *Pekin D.A.* Plate steel-reinforced concrete construction. Moscow: DIA Publ.; 2010. (In Russian).
20. SP 430.1325800.2018. Monolithic structural systems. Design rules. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
21. *Belostotsky A.M., Dubinsky S.I.* Analysis of the causes of the collapse of the structures of the coating of the Transvaal Park SOC. Ansys Solutions. Russian edition [internet]. 2007 Winter: 5–12. Available at: <https://scadsoft.com/download/Transvaal.pdf>. (In Russian).
22. Flat girderless reinforced concrete floors: a methodological guide [Internet]. Moscow; 2017. Available at: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf. (In Russian).
23. *Perelmuter A.V., Tur V.V.* Whether we are ready to proceed to a nonlinear analysis at designing? International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2017;13(3):86–102. (In Russian). <https://doi.org/10.22337/1524-5845-2017-13-3-86-102>
24. *Mozgolov M.V., Kozlova E.V.* Creation of a SCAD verification model for the design calculations of a reinforced-concrete waffle slab floor system. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;32(1):128–140. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Валентинович Мозголов, канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительное производство» Коломенского института (филиала) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Коломна
e-mail: mvmozgolov@yandex.ru

Mikhail V. Mozgolov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Construction Works, Kolomna Institute (Branch), Moscow Polytechnic University, Kolomna
e-mail: mvmozgolov@yandex.ru

Елизавета Вадимовна Козлова✉, студент 4-го года обучения направления «Строительство» Коломенского института (филиала) ФГАОУ ВО «Московский политехнический университет», Коломна
e-mail: lizakozlova2014@gmail.com

Elizaveta V. Kozlova✉, 4th year student, Kolomna Institute (branch), Moscow Polytechnic University, Kolomna
e-mail: lizakozlova2014@gmail.com

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 699.941, 624.07, 699.81

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-37-70](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-37-70)

EDN: ETZDYW

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ РАСЧЕТОВ ПОЖАРОВ В ЗДАНИЯХ И ПОМЕЩЕНИЯХ

Д.И. ПУЦЕВ¹, д-р техн. наукЮ.В. КРИВЦОВ², д-р техн. наукЮ.М. ГРОШЕВ^{2,✉}, канд. техн. наукН.А. ЛОБАНОВА³, 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 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

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

Аннотация

Введение. В данной статье представлена информация о применении комплекса программного обеспечения с использованием полевой модели динамики пожара для проведения расчетов пожаров в зданиях и помещениях атомных станций. Приведены обоснования для использования возможности данного комплекса при проведении расчетов пожаров в зданиях и помещениях различного назначения.

Цель работы – проведение анализа различных методов моделирования пожара, области их применения, использования комплекса программного обеспечения полевой модели динамики пожара для определения динамики параметров опасных факторов пожара в помещениях сложной конфигурации, с неравномерно распределенной пожарной нагрузкой, сложным режимом газообмена, а также при решении задачи определения безопасных расстояний, обеспечивающих невозможность распространения пожара между элементами оборудования.

Материалы и методы. Разработан и верифицирован комплекс программного обеспечения, позволяющий проводить расчеты с использованием полевой модели динамики пожара. Рассмотрены основы полевого метода моделирования пожара в помещениях различного назначения и особенности его применения для моделирования пожаров. Авторы статьи сопроводили представленный аналитический материал примерами результатов моделирования пожара в реальных помещениях АЭС.

Результаты. На основании проведенного анализа различных методов моделирования динамики развития и распространения опасных факторов пожара показана возможность использования различных методов моделирования пожара при анализе пожарной опасности зданий и помещений. Показаны преимущества методики полевого моделирования для проведения расчетов локальных параметров пожара. Приведена информация о программных кодах, применяющихся для расчета динамики пожаров и оценки теплового воздействия пожаров на строительные конструкции.

Выводы. Показано применение полевой модели динамики пожара для проведения расчетов опасных факторов пожара в различных зданиях, помещениях и на открытых площадках. Расчеты с использованием предложенной полевой модели позволяют обосновать достаточность огнестойкости строительных конструкций зданий и помещений различного назначения исходя из обеспечения нераспространения

пожара за пределы пожарной зоны в течение расчетного времени свободного выгорания всей пожарной нагрузки.

Ключевые слова: полевая модель динамики пожара, комплекс программного обеспечения, интегральный метод

Для цитирования: 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)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование выполнялось за счет средств ФГБУ ВНИИПО МЧС России и ООО «НТЦ ППБ».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.04.2023

Поступила после рецензирования 03.05.2023

Принята к публикации 16.05.2023

EVALUATING FEASIBILITY OF FIELD MODELING OF FIRE TO CALCULATE FIRE CHARACTERISTICS IN BUILDINGS AND PREMISES

D.I. PUTSEV¹, Dr. Sci. (Engineering)

Yu.V. KRIVTSOV², Dr. Sci. (Engineering)

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

N.A. LOBANOVA³, Cand. Sci. (Engineering)

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

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

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

Abstract

Introduction. The present paper describes application of a software package using a field model of fire dynamics to calculate fire characteristics in buildings and premises of nuclear power plants (NPP). The authors give necessary justifications for using the software package in performing fire calculations in multifunctional buildings and premises.

Aim. To analyze different fire modeling methods, their application and use of the software package for field modeling of fire dynamics to determine the dynamics of fire hazards in complex premises, in facilities with non-uniform fire loads or complex gas exchange processes; to contribute solving the issue of safe distances ensuring that fire cannot spread between equipment elements.

Materials and methods. The authors developed and verified a software package to perform calculations using the field model of fire dynamics. The paper presents the basics of the field method for fire modeling in multifunctional premises and the aspects of its application in fire simulation. The presented analytics is substantiated with examples of fire simulation results in real premises of NPPs.

Results. Following the analysis of different methods of modeling the dynamics of development and spread of fire hazards, the present paper introduces the possibility of using various methods of fire modeling in the evaluation of fire hazards for buildings and premises. The authors describe the advantages of field modeling method for calculating local parameters of fire. The paper provides information on the software codes to calculate the dynamics of fire and evaluate the thermal effects of fire on building structures.

Conclusion. It has been found possible to apply field model of fire dynamics for calculating fire hazards in various buildings, premises and open areas. Calculations using the presented field model enable the sufficiency of fire resistance of building structures and multifunctional premises to be substantiated due to preventing fire spread outside the fire zone during the estimated time of burnout of the total fire load.

Keywords: field model of fire dynamics, software package, integral method

For citation: 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)

Author contribution statements

All authors made equal contributions to the preparation of this article.

Funding

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

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 17.04.2023

Revised 03.05.2023

Accepted 16.05.2023

Введение

В последние годы как в России, так и за рубежом (Швеция, Великобритания, США, Канада, Испания, Япония, Австралия и др.) наметился переход к гибкому (объектно-ориентированному) нормированию, которое позволяет наиболее оптимальным образом обеспечить пожарную безопасность объекта с учетом его функциональных особенностей, в отличие от «жесткого» нормирования, предписывающего строгое соблюдение требований пожарной безопасности, установленных в нормативных правовых актах и нормативных документах по пожарной безопасности. Гибкое (объектно-ориентированное) нормирование предполагает многоуровневую систему требований и методов, в которой установленные критерии достижения цели должны быть подтверждены расчетно-аналитическими или экспериментальными методами [1]. В связи с этим особую важность приобретают расчетно-аналитические обоснования пожарной безопасности объектов защиты, выполняющиеся в поддержку принимаемых решений. Например, в области атомной энергетики для подтверждения достаточности уровня противопожарной защиты энергоблока предписывается выполнение специального анализа – анализа влияния пожаров и их последствий на безопасный останов и расхолаживание реакторной установки, локализацию и контроль радиоактивных выбросов в окружающую среду. В ходе выполнения этой работы для каждого энергоблока осуществляется проверка достаточности принятых

проектом пределов огнестойкости противопожарных преград, являющихся границами пожарных зон, и безопасных (предельных) расстояний между элементами оборудования, обеспечивающих невозможность потери резервируемых элементов безопасности по общей причине пожара. При этом обоснование выполняется из условия, что указанные противопожарные преграды и безопасные расстояния должны обеспечивать нераспространение пожара за пределы пожарной зоны в течение времени полного свободного (без учета воздействия на пожар огнетушащих веществ) выгорания пожарной нагрузки, то есть рассматривается вариант отказа автоматических установок пожаротушения. Таким образом, очевидно, что анализ влияния пожаров на безопасность энергоблока требует серьезного расчетно-аналитического обоснования, основанного на применении различных расчетных методов моделирования пожаров. При этом особое значение приобретают вопросы верификации моделей и обоснованности их применения для оценки пожарной опасности и обоснования достаточности систем противопожарной защиты конкретных объектов.

Расчетные методы включают в себя:

- эмпирические методики оценки динамики пожара;
- интегральный метод расчета среднеобъемных параметров пожара;
- методику расчета локальных параметров пожара (полевое моделирование);
- методику определения требований к огнестойкости конструкций.

Эмпирические методики оценки динамики пожара

Простейший пример использования эмпирических методик оценки динамики пожара – проведение расчетов на основе оценки продолжительности «стандартного температурного режима». Модель стандартного температурного режима пожара описана в работе [2].

Стандартная температурная кривая представлена на рис. 1. Зависимость продолжительности стандартного пожара от удельной пожарной нагрузки анализируемых помещений приведена на графике (рис. 2).

Определив удельную пожарную нагрузку в помещении, по графику на рис. 2 можно найти соответствующую продолжительность стандартного пожара, затем по графику на рис. 1 для найденной продолжительности стандартного пожара можно найти соответствующую температуру в помещении.

Консервативные подходы, определенные в данной методологии, не учитывают мероприятий по тушению, ограничений по доступу кислорода в зону пожара для герметичных или частично герметичных помещений и используются в пределах своей области определения, установленной по условиям проводимых экспериментов, на основе которых была установлена зависимость продолжительности стандартного пожара от удельной пожарной нагрузки, а именно:

- горение преимущественно твердой горючей нагрузки;
- доступ кислорода в зону пожара не ограничен;
- максимальная удельная пожарная нагрузка в помещении не превышает 1500 МДж/м^2 .

В существующей практике выполнения анализов влияния пожаров и их последствий на безопасный останов и расхолаживание реакторной установки, локализацию и контроль радиоактивных выбросов в окружающую среду для различных энергоблоков АЭС расчеты требуемой огнестойкости методом оценки продолжительности «стандартного температурного

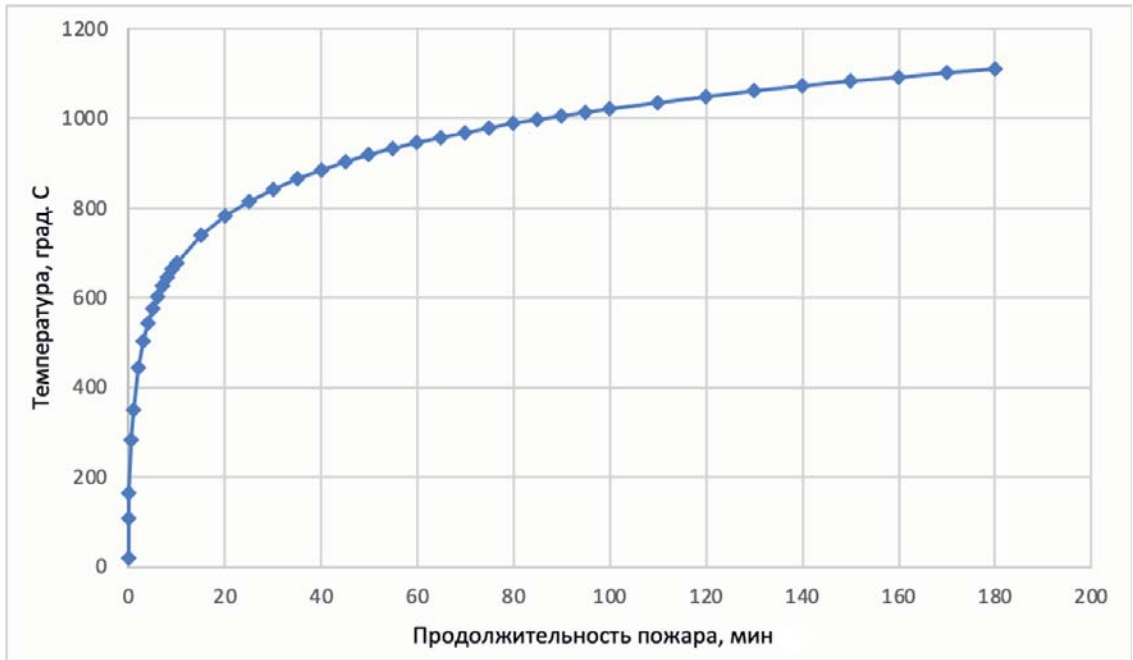


Рис. 1. Зависимость температуры стандартного пожара (°C) от времени, мин

Fig. 1. Dependence of standard fire temperature (°C) on time, min



Рис. 2. Зависимость продолжительности стандартного пожара (мин) от удельной пожарной нагрузки, МДж/м²

Fig. 2. Dependence of standard fire duration (min) on fire load density, MJ/m²

режима» используются как скрининговый критерий при проведении консервативной оценки требований к огнестойкости ограждающих конструкций для помещений с относительно невысокой пожарной нагрузкой. В данном проекте к таким помещениям можно отнести помещения с пожарной нагрузкой не более 1500 МДж/м^2 .

Другими примерами использования эмпирических методик оценки динамики пожара являются методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения и метод расчета требуемого предела огнестойкости, изложенные в ГОСТ Р 12.3.047-12 ССБТ [3]. Указанные методы расширяют подход, описанный выше, с целью получить более точные количественные требования к пределам огнестойкости строительных конструкций с учетом фактических характеристик пожарной нагрузки и воздухообмена помещения с окружающей средой. Методы разработаны ВНИИПО на основе результатов обобщения экспериментальных данных по пожарам в жилых помещениях. Поскольку областью определения данных методов являются помещения, имеющие воздухообмен с окружающей средой при степени проемности (рассчитанной по отношению площади проемов к площади пола) в пределах 3–33 %, их применение для расчетов пожаров в помещениях пожарных зон АЭС, имеющих значительные ограничения по связи с окружающей средой, лежит за пределами области определения.

Интегральный (зонный) метод расчета среднеобъемных параметров пожара

Методы расчета среднеобъемных параметров пожара рекомендованы в качестве аналитических методов определения требований к границам пожарных зон для АС в тех случаях, когда полуэмпирические расчетные методы не могут быть использованы из-за ограничений их области применения.

Практически важные результаты моделирования пожаров на уровне усредненных характеристик можно ожидать в том случае, когда газовую среду с достаточной степенью достоверности можно считать однородной, следовательно, отсутствуют значительные градиенты определяющих параметров, что дает основание описать их среднеобъемными характеристиками (т. е. среднеобъемные и локальные значения параметров мало отличаются между собой). Приведенные условия, ограничивающие применение интегрального метода моделирования, означают, что этот метод можно использовать в том случае, когда при пожаре в помещении существует хорошее перемешивание продуктов горения и поступающего воздуха, а горение происходит во всем объеме помещения. Такое состояние характерно для объемных пожаров в развивающейся, развитой и затухающей стадиях пожара, в условиях горения распределенной пожарной нагрузки.

Наиболее эффективно интегральный метод моделирования используется для прогнозирования поведения строительных конструкций в условиях пожара, поскольку прогрев конструкций в большинстве случаев наиболее интенсивен в развитой стадии пожара. Проведенные исследования локальных пожаров и начальной стадии пожара позволили определить границы применения интегрального моделирования для решения практических задач пожарной безопасности и, в частности, для исследования устойчивости строительных конструкций в условиях пожара.

Метод расчета динамики пожара на основе среднеобъемной модели строится на основе уравнений материального баланса и баланса энергии для исследуемого помещения. Расчетная схема, которая приводится по [4], представлена на рис. 3.

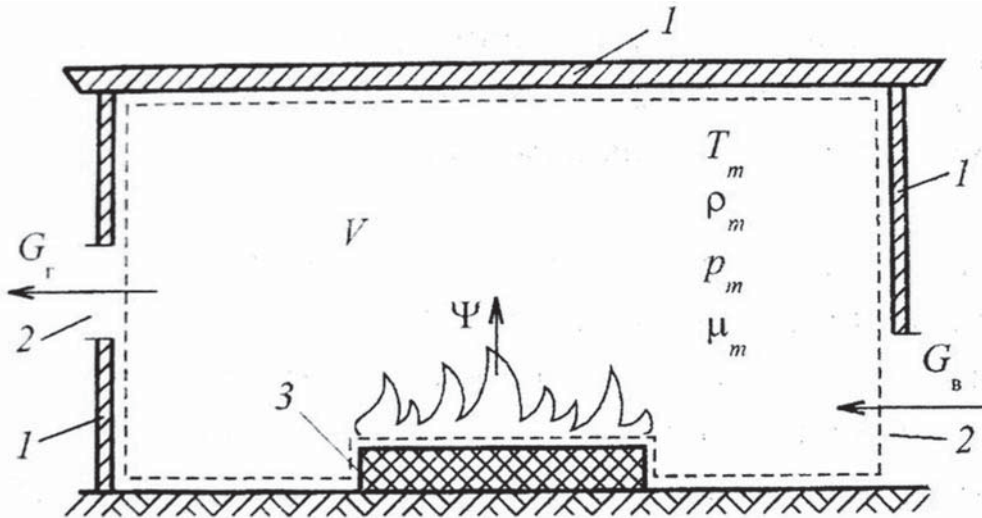


Рис. 3. Схема термодинамической системы пожара в помещении:

1 – ограждения; 2 – проемы (окна, двери); 3 – горящий материал;

G_{Γ} – расход уходящих газов; $G_{\text{В}}$ – расход поступающего холодного воздуха;

ψ – скорость выгорания материала; T_m – среднемассовая температура газовой среды;

ρ_m – средняя по объему плотность газовой среды; p_m – среднеобъемное давление;

μ_m – среднеобъемная оптическая плотность дыма.

Контрольная поверхность обозначена пунктиром

Fig. 3. Schematic diagram for thermodynamic system of fire in premises:

1 – fencing; 2 – openings (windows, doors); 3 – burning material;

G_{Γ} – exhaust gas flow rate; $G_{\text{В}}$ – incoming cold air flow rate;

ψ – material combustion rate; T_m – bulk temperature of gaseous medium;

ρ_m – average volume density of gaseous medium; p_m – volume-averaged pressure;

μ_m – volume-averaged optical density of smoke.

The reference surface is indicated by a dotted line

Уравнение материального баланса для газовой среды в помещении:

$$\frac{d(\rho_m V)}{dt} = G_{\text{В}} + \psi - G_{\Gamma}. \quad (1)$$

Уравнение баланса массы кислорода:

$$\frac{d(\rho_1 V)}{dt} = x_{1\text{В}} G_{\text{В}} - x_1 n_1 G_{\Gamma} - \psi L_1 \eta. \quad (2)$$

Уравнение баланса продукта горения:

$$\frac{d(\rho_2 V)}{dt} = \psi L_2 \eta - x_2 n_2 G_{\Gamma}. \quad (3)$$

Уравнение энергии пожара имеет вид (предполагается, что кинетическая энергия движения газовой среды в помещении пренебрежимо мала по сравнению с ее внутренней энергией, а потоки массы газов через некоторые участки контрольной поверхности (проемы) характеризуются тем, что в них удельная кинетическая энергия газа пренебрежимо мала по сравнению с удельной энтальпией):

$$\frac{d(\rho_m t)}{dt} = \psi Q_H \eta + i_\Gamma \psi + c_{PB} T_B G_B - c_P T_m m G_\Gamma - Q_w, \quad (4)$$

где i_Γ – энтальпия продуктов горения;

c_{PB} – изобарная теплоемкость воздуха при постоянном давлении;

T_B – температура воздуха;

Q_w – теплота, уходящая в ограждающие конструкции.

Результат интегрирования системы уравнений (1)–(4) в комплексе с начальными условиями состояния среды до начала пожара используется в качестве расчетной модели для оценки опасных факторов пожара на начальной стадии пожара с учетом ряда дополнительных предположений:

- отсутствия притока воздуха в помещение пожара;
- постоянного давления в помещении;
- неизменности коэффициента теплопотерь (отношения теплопотерь в конструкции к тепловыделению пожара);
- неизменности молекулярной массы газовой среды;
- использования эмпирической формулы экспоненциального распределения параметров среды по высоте помещения.

Описанная среднеобъемная модель используется в расчетно-аналитических обоснованиях динамики пожаров на АЭС для моделирования развития пожара в электротехнических помещениях и оценки термического воздействия на их конструкции. Из вышеперечисленных предположений используется только предположение о постоянстве давления внутри помещения, что позволяет корректно использовать модель, являющуюся следствием точных уравнений сохранения массы и энергии на различных стадиях развития пожара. Постоянство давления с достаточно высокой степенью следует из отсутствия мероприятий по герметизации дверей, люков, клапанов (за исключением гермообъема здания реактора, для которого модель не применяется), что ведет к невозможности удержания давления пожара при его развитии на различных стадиях. Наличие преимущественно твердых горючих материалов в электротехнических помещениях, условно герметичных при закрытых дверях и вентиляционных клапанах, обуславливает относительно медленное развития пожара и выравнивание давления с окружающими помещениями через неплотности.

Расчеты параметров пожара для указанных помещений проводятся путем совмещения рассматриваемой среднеобъемной модели для расчетов параметров газовой среды и полевой модели динамики пожара, представленной ниже. Характеристики газовой среды в помещении определяются в результате непосредственного расчета по уравнениям баланса (1)–(4). Тепловые потоки в окружающие конструкции также получаются в результате расчетного решения сопряженной задачи теплообмена с учетом конвективной и излучательной составляющих. При расчетах используется еще одно дополнительное предположение – отсутствие одновременно входящих и выходящих потоков газовой среды. Данные потоки определяются, при известной степени негерметичности, разностью давления анализируемого и окружающих помещений. Двухсторонние возвратно поступательные потоки возникают только в помещениях с достаточно высокой степенью проемности. Критерием их существования является степень проемности около 4–5 %. Естественно, что помещения АЭС, в которых постоянно осуществляется автоматический контроль закрытого состояния

дверей, а газообмен происходит только через неплотности, имеют условную проемность на порядок меньше указанной критической величины.

Методика расчета локальных параметров пожара (полевое моделирование)

В тех случаях, когда требуется рассчитать локальные параметры развития пожара или область применения, не позволяется использовать эмпирические или среднеобъемные модели, в практике моделирования пожара на АЭС для расчета динамики пожара применяется созданная во ВНИИПО полевая модель [1]. Это, прежде всего, относится 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 рекомендаций по применению методов полевого моделирования.

Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов, поскольку он основан на решении уравнений в частных производных, выражающих фундаментальные законы сохранения в каждой точке расчетной области. С его помощью можно рассчитать температуру, скорость, концентрацию компонентов смеси и т. д. в каждой точке расчетной области. В связи с этим полевой метод может использоваться:

- для проведения научных исследований в целях выявления закономерностей развития пожара;
- для проведения сравнительных расчетов в целях апробации и совершенствования менее универсальных зональных и интегральных моделей, проверки обоснованности их применения;
- для выбора рационального варианта противопожарной защиты конкретных объектов.

В своей основе полевой метод не содержит никаких априорных допущений о структуре течения, и в связи с этим он принципиально применим для рассмотрения любого сценария развития пожара.

Вместе с тем следует отметить, что его использование требует значительных вычислительных ресурсов. Это накладывает ряд ограничений на размеры рассматриваемой системы и снижает возможность проведения многовариантных расчетов. Поэтому перечисленные выше методы моделирования также являются важными инструментами в оценке пожарной опасности объектов в тех случаях, когда они обладают достаточной информативностью и сделанные при их формулировке допущения не противоречат картине развития пожара.

Однако можно утверждать, что поскольку априорные допущения зонных моделей могут приводить к существенным ошибкам при оценке пожарной опасности объекта, предпочтительно использовать полевой метод моделирования в следующих случаях:

- для помещений сложной геометрической конфигурации, а также помещений с большим количеством внутренних преград;
- для помещений, в которых один из геометрических размеров гораздо больше остальных;
- для помещений, где существует вероятность образования рециркулярных течений без формирования верхнего прогретого слоя (что является основным допущением классических зонных моделей);

– в иных случаях, когда другие модели являются недостаточно информативными для решения поставленной задачи, либо есть основания считать, что развитие пожара может существенно отличаться от априорных допущений.

Данная математическая модель пожара предусматривает решение системы уравнений газодинамики и теплообмена с учетом моделирования процессов горения и переноса тепла излучением.

Система уравнений полевой модели имеет следующий вид:

Уравнение неразрывности газовой смеси

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0.$$

Уравнения движения газовой смеси в проекции на оси координат (записаны для декартовой системы)

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu - \tau_{xx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv - \tau_{xy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw - \tau_{xz})}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x},$$

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho vu - \tau_{yx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv - \tau_{yy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw - \tau_{yz})}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y},$$

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho wu - \tau_{zx})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv - \tau_{zy})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww - \tau_{zz})}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} - g,$$

где тензор напряжений $\tau_{ij} = \mu_{\Sigma} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$, $i, j, k = 1, 2, 3$.

Уравнение энергии

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(uh)}{\partial x} + \frac{\partial(vh)}{\partial y} + \frac{\partial(wh)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} (\text{div}(q) - q_v).$$

Уравнения переноса для различных компонент газовой смеси

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \frac{\partial(uC_i)}{\partial x} + \frac{\partial(vC_i)}{\partial y} + \frac{\partial(wC_i)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} (\text{div}(j_i) - q_i).$$

Уравнения состояния компонентов газозооушной смеси

$$\rho = F(P^*, T, C_i),$$

где x, y, z – пространственные координаты;

u, v, w – компоненты скорости газозооушных потоков в направлении координат x, y, z ;

$\mu_\Sigma, \lambda_\Sigma, D_\Sigma$ – суммарные (молекулярные и турбулентные) коэффициенты вязкости, теплопроводности и диффузии соответственно;

p – локальное давление;

P^* – среднеобъемное давление;

ρ – плотность среды;

T, h – температура и энтальпия;

C_i – массовая концентрация соответствующего компонента;

q – удельный тепловой поток;

q_v – тепловыделение в единице объема;

j_i – удельный массовый поток i -го компонента;

q_i – скорость образования (поглощения) i -го компонента в единице объема.

Система уравнений решается совместно с уравнениями диффузионных потоков:

$$q = -\lambda_\Sigma \text{grad} T + \sum h_i j_i$$

$$j_i = -\rho D_\Sigma \text{grad} C_i.$$

Для определения турбулентного переноса массы и энергии используется гипотеза турбулентной вязкости Буссинеска. При расчете распределения коэффициента турбулентной вязкости применяется k - ε модель турбулентности. В этой модели распределение коэффициента турбулентной вязкости μ находится из решения двух дифференциальных уравнений для кинетической энергии k турбулентности и скорости ее диссипации ε :

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w k)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_\Sigma}{Pr_k} \frac{\partial k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_\Sigma}{Pr_k} \frac{\partial k}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_\Sigma}{Pr_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right) + g_k$$

$$\frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u \varepsilon)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v \varepsilon)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w \varepsilon)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\mu_\Sigma}{Pr_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\mu_\Sigma}{Pr_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\mu_\Sigma}{Pr_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + g_\varepsilon$$

Источниковые члены в данных уравнениях описываются следующими зависимостями, включающими генерацию турбулентности при естественной конвекции:

$$g_k = P_k + G_k - \varepsilon$$

$$g_\varepsilon = C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (P_k + G_k) (1 + C_{3\varepsilon} R_f) - C_{2\varepsilon} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$G_k = \frac{\mu_t}{Pr_k} \beta g \frac{\partial T}{\partial z}$$

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad R_f = -G_k / (P_k + G_k)$$

Значения констант					
C_μ	C_{Te}	C_{2e}	C_{3e}	Pr_k	Pr_ϵ
0,09	1,44	1,92	0,8	1,0	1,3

Коэффициент турбулентной вязкости находится по соотношению: $\mu_t = C_\mu \frac{\rho k^2}{\epsilon}$.
Эффективные турбулентные потоки тепла, массы компонент, кинетической энергии турбулентности и скорости ее диссипации рассчитываются на основе аналогии турбулентной вязкости и турбулентных коэффициентов диффузии при постоянных турбулентных числах $Pr_t (Sc_t)$:

$$q_t = -\lambda_t grad T, \text{ где } \lambda_t = \mu_t / Pr_t \text{ и т. д.}$$

Модель горения
Для описания физико-химических процессов при горении используются два подхода: моделирование химических реакций или задание эквивалентных горению тепловых и массовых потоков в качестве граничных условий на поверхностях горения.

Моделирование химических реакций горения
Реально протекающие химические процессы горения аппроксимируются одноступенчатой химической реакцией горения:

$$\text{топливо}(fu) + s \text{ окислитель}(ox) = (1 + s) \text{ продукты}(pr).$$

При этом предполагается, что скорость протекания процесса горения лимитируется не скоростью протекания самой химической реакции, а скоростью взаимной диффузии компонентов, то есть горение носит явно выраженный диффузионный характер.
Массовая скорость выгорания топлива в единице объема R_{fu} рассчитывается по формуле:

$$R_{fu} = \rho \frac{\epsilon}{k} \min \left[c_r C_{fu}, c_r \frac{C_{ox}}{s} \right].$$

Требуемые для расчета скорости реакции локальные значения кинетической энергии турбулентности k и скорости ее диссипации ϵ находятся в процессе решения уравнений, входящих в модель турбулентности.

Методика определения требований к огнестойкости конструкций

Эмпирические методы расчета режима пожара и степени воздействия опасных факторов пожара на конструкции во многих случаях дают непосредственную оценку эквивалентной (по степени воздействия) продолжительности пожара на строительные конструкции. 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 или локальных характеристик. На основе эмпирических методов определяется эквивалентная продолжительность пожара для различных типов строительных конструкций;

2) производится решение сопряженной задачи теплообмена, т. е. 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 в общем случае более точные результаты, т. к. определяется фактическая огнестойкость, а не пересчет на результаты испытаний в стандартных условиях.

Программные коды, применяющиеся для расчета динамики пожаров и оценки теплового воздействия пожаров на строительные конструкции

При проведении расчетов по эмпирическим расчетным методикам применяются расчеты по зависимостям, заданным в электронных таблицах с характеристиками помещений. Используется также реализация в виде программной оболочки для MS Windows, написанная на языке C (Borland C++, ver. 4.0).

При проведении расчетов среднеобъемных характеристик пожара в помещении используется программа FVolume. Программный код написан на языке FORTRAN 77. Результаты расчетов верифицировались на основе экспериментальных данных о динамике пожара и существующих аналитических решений обыкновенных дифференциальных уравнений.

При моделировании пожара для расчета температуры поверхности конструкции и динамики распределения поля температуры внутри конструкции используется программный код 1Dconduction, предназначенный для решения одномерной нестационарной задачи теплопроводности с учетом переменных теплофизических характеристик материала. Код реализован на языке C++. Верификация проводилась на основе сравнения с результатами аналитического решения одномерной нестационарной задачи теплопроводности.

Для реализации описанной выше трехмерной полевой модели динамики пожара во ВНИИПО разработан комплекс программ Fire Dynamics. Программный комплекс позволяет проводить моделирование пожаров как в помещениях различной геометрии, так и на открытых промышленных площадках. Программное обеспечение написано на объектно-ориентированном языке C++. Комплекс программ выполнен в базовой (научной) и инженерной версиях. Инженерная версия включает реализацию некоторых полуэмпирических зависимостей, описывающих изменение параметров горения (скорости выгорания горючих материалов, скорости распространения пламени по горючей нагрузке и т. д.) в зависимости от условий развития пожара.

Параметры модели и программный код прошел основную и дополнительную (применительно к условиям моделирования задач на АЭС) верификации [5, 6].

Отчет о верификации программного средства Fire Dynamics [5] разработан в соответствии с требованиями РД 03-33-2008 «Инструкция об организации проведения экспертизы программных средств, применяемых при обосновании и (или) обеспечении безопасности объектов использования атомной энергии» [7] и РД 03-34-2000 «Требования к составу

и содержанию отчета о верификации и обосновании программных средств, применяемых для обоснования безопасности объектов использования атомной энергии» [6]. Отчет является основным документом, обосновывающим способность программного средства Fire Dynamics моделировать и рассчитывать параметры опасных факторов пожара в зданиях, сооружениях, помещениях и промплощадках АЭС. Целью отчета являлось обоснование возможности использования предлагаемого к рассмотрению программного средства Fire Dynamics в заявленной области применения путем сравнения с экспериментальными данными.

Программное средство (ПС) не имеет самостоятельных модулей. Автором ПС является д-р техн. наук Пуцев Дмитрий Игоревич.

Организацией-заявителем является Научно-технический центр «Промышленная и пожарная безопасность». Программный комплекс используется Научно-техническим центром «Промышленная и пожарная безопасность» (ООО «НТЦ СПб») и Научно-исследовательским институтом противопожарной обороны (ФГБУ ВНИИПО МЧС России).

Сведения об операционной системе, языке (языках) программирования, требованиях к ЭВМ, на которых возможно выполнение расчетов с применением ПС: операционные системы: Windows XP SP3, Windows 7; язык (языки) программирования: C++ стандартная версия (компиляторы Microsoft Visual, Borland или др.).

Программное средство предназначено для моделирования пожара на АЭС с целью получения локальных значений опасных факторов пожара и оценки уровня их воздействия на оборудование и конструкции станции. ПС предполагается использовать для проектных или эксплуатационных расчетов, в том числе для обоснования безопасности объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) в документах, представляемых в надзорные органы РФ в рамках процедуры лицензирования ОИАЭ. По погрешности расчетов ПС не относится к классу реперных, а используется в качестве средства научных и инженерных расчетов.

Расчетными параметрами являются локальные значения температуры, составляющих скорости газовой среды в объеме, концентраций продуктов горения и кислорода, тепловые потоки; среднеобъемные значения температуры, давления, концентрации компонент газовой среды.

ПС позволяет достигать условий сходимости и устойчивости решения. Сходимость и устойчивость анализировались: аналитическим путем для линейных аналогов одномерных уравнений переноса; проверкой симметричности и асимптотичности решения при задании соответствующих начальных и граничных условий; обнаружением волновой неустойчивости решения при контроле нижней границы расчетных параметров (локальные значения температур или концентраций меньше (для кислорода – больше) начальных).

Точность вычисления расчетных параметров в рамках используемых моделей может быть доведена до 2–5 % путем подбора пространственной сетки и шагов интегрирования. Получение более точного решения не имеет смысла, поскольку общая погрешность определяется погрешностью используемых моделей и экспериментальных параметров.

В ходе верификации выполнялось следующее тестирование:

Тестовый пример № 1 – расчет и эксперимент по горению кабелей в кабельном тоннеле.

Во ВНИИПО была проведена серия экспериментов по развитию пожара в кабельных помещениях. Для верификации математических моделей и программных кодов были выполнены расчеты динамики пожара кабелей и сравнение результатов с данными экспериментов для пожара, возникающего на восьми кабельных трассах. Горение кабельных трасс

инициировалось керосином, залитым в противень размером $0,5 \times 0,5$ м в количестве 10 литров. Были проведены эксперименты для различной пожарной нагрузки кабельных трасс, различных режимов газообмена и вентиляции. Были также проведены дополнительные эксперименты с целью выявить влияние горения керосина на динамику развития пожара с целью оценки степени влияния мощности и длительности действия источника зажигания. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показали возможность использования модели и программного кода для моделирования пожара в помещениях больших объемов. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных (относительная погрешность) составило 22 %.

Тестовый пример № 2 – расчет и эксперимент по горению горючей жидкости в машинном зале ТЭС.

Специалистами ВНИИПО были проведены натурные эксперименты по горению ГЖ в машинном зале. Эксперимент проводился на действующей ТЭС в период планового ремонта. Задачей эксперимента являлось определение режима нарастания слоя продуктов горения в объеме зала и оценка характеристик (температура, видимость) в области продуктов горения. Очаг пожара представлял собой противень с керосином размером $4,5 \times 1,5$ м. Сравнение экспериментальных и расчетных данных показало возможность использования модели и программного кода для моделирования пожара в помещениях больших объемов. Максимальное расхождение расчетных и экспериментальных данных (относительная погрешность) составило 16 %.

Тестовый пример № 3 – расчет и эксперименты по горению шкафов с электронной и электротехнической аппаратурой, исследования воздействия ОФП на шкафы электронных и электротехнических устройств.

Во ВНИИПО была создана установка для оценки воздействия опасных факторов пожара на системы управления защитой реактора (СУЗ). В качестве условий для испытания шкафов СУЗ на устойчивость к воздействию продуктов горения был выбран наиболее реальный и наиболее жесткий случай подвода продуктов горения из специального генератора дыма непосредственно под середину устройства. В качестве горючей нагрузки в генераторе дыма использовался наиболее характерный и наиболее опасный с точки зрения выделения продуктов горения материал – изоляция кабелей. Серия экспериментов была посвящена исследованию воздействия теплового излучения и температуры на отдельные элементы электронных устройств. Проведены два огневых эксперимента по исследованию режимов горения стоек с электронной аппаратурой. Для условий, близких к условиям экспериментов, проведено расчетное моделирование горения. Погрешность расчета максимальной температуры пламени по сравнению с экспериментальными данными составила 17 %. Поскольку данные о скорости выгорания и режимах отказов элементов стоек управления являются уникальными, они непосредственно используются при приведении расчетов.

По итогам верификации отмечено, что описанные методы определения эквивалентной продолжительности пожара для несущих и ограждающих конструкций не нуждаются в доработке для использования на АЭС и могут быть использованы для определения требований к границам пожарных зон. В работе показано, что приведенные методы расчета динамики пожара и требования к огнестойкости строительных конструкций являются достаточно достоверными, отличаются относительно невысокой трудоемкостью при использовании, но имеют ограниченную область применения. Поскольку данные

расчетные методы построены на основе результатов экспериментальных исследований, область применимости приведенных зависимостей определяется интервалом варьирования различных параметров в ходе соответствующих экспериментов. Область применения конкретных зависимостей описана в оригинальных работах по исследованию динамики пожара в помещениях.

Результаты

В рамках работ по обеспечению пожарной безопасности АЭС была разработана методика расчета динамики возможных пожаров для оценки воздействия опасных факторов на оборудование, в первую очередь систем безопасности, и на строительные конструкции атомных станций.

На основе выполненных расчетов с применением полевой модели динамики пожара были предложены и внедрены мероприятия по обеспечению пожарной безопасности действующих АЭС России: Балаковской, Белоярской, Билибинской, Волгодонской, Калининской, Кольской, Курской, Ленинградской, Ростовской, Нововоронежской и Смоленской, а также новых строящихся отечественных и зарубежных АЭС: Тяньваньской АЭС в Китае, АЭС Кудан-Кулам в Индии, АЭС «Бушер» в Иране, Белорусской АЭС.

Расчетные результаты вошли в проектную документацию и отчеты по безопасности, прошедшие в установленном порядке рассмотрение в надзорных органах (Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору, Государственный пожарный надзор) и Главной государственной экспертизой проектов, что является убедительным доказательством возможности ее дальнейшего применения.

Анализ результатов расчетов

Далее в качестве примеров использования методов моделирования пожара представлены некоторые результаты моделирования пожаров в пожароопасных помещениях АЭС.

Пример 1. Кабельная шахта категории В1 по пожарной опасности:

- удельная пожарная нагрузка в помещении 4077,7 МДж/м²;
- геометрические характеристики помещения: площадь 6 м², высота 3,6 м.

Анализ термического воздействия пожара на несущие и ограждающие конструкции помещения проводится на основе математического моделирования с применением описанной выше интегральной модели расчета среднеобъемных параметров пожара.

При анализе предполагалось несрабатывание системы пожаротушения вследствие отказа. При этом предполагается нормальная работа других независимых элементов противопожарной защиты:

- закрытие огнезадерживающих клапанов вентиляции (срабатывающих как по сигналу автоматической установки пожаротушения, так и по пассивному признаку – плавлению легкоплавких вставок);
- закрытое состояние дверей (параметр, контролируемый датчиками контроля закрытого состояния дверей).

Вследствие выполнения вышеуказанных условий рассматриваемые помещения могут считаться условно герметичными. Расчеты проводятся для кругового распространения

пожара в начальной стадии, перехода пожара в объемную стадию и максимальных значений теплоты сгорания и скорости выгорания материала.

Расчет ведется для толщины ограждающих конструкций – 200 мм. Выполняется оценка прогрева защитного слоя бетона толщиной 20 мм с целью подтверждения условия обеспечения устойчивости конструкций к термическому воздействию пожара в исследуемом помещении с учетом его фактических пожарных нагрузок. Главным условием обеспечения такой устойчивости является прогрев защитного слоя бетона до температур, не превышающих 500 °С, что гарантирует прогрев арматуры до температур, не превышающих этот показатель (максимальная температура на необогреваемой стороне конструкции не играет принципиальной роли при полученных длительностях пожара для рассматриваемых типов конструкций, что хорошо видно на графиках динамики распределения абсолютной температуры по сечению окружающих конструкций, рис. 4). Полученные результаты представлены на рис. 4–9 и в табл. 1.

Из результатов расчета для помещения шахты следует:

Около 180 с происходит линейное распространение пожара, потом пожар переходит в объемную стадию. Рост температуры среды в объемной стадии длится около 40 с. Избыточная температура на максимуме ~520 °С.

После ~220-й секунды начинается снижение температуры вследствие снижения интенсивности пожара из-за снижения концентрации кислорода. С этого момента теплопотери в конструкции превышают мощность пожара, суммарная тепловая мощность для среды помещения становится отрицательной. Начинается остывание.

Пример 2. Анализ пожара в помещении транспортного въезда.

В расчетных сценариях анализируется горение автомобиля в транспортном въезде в результате разлива и возгорания автомобильного топлива при открытом для погрузочных

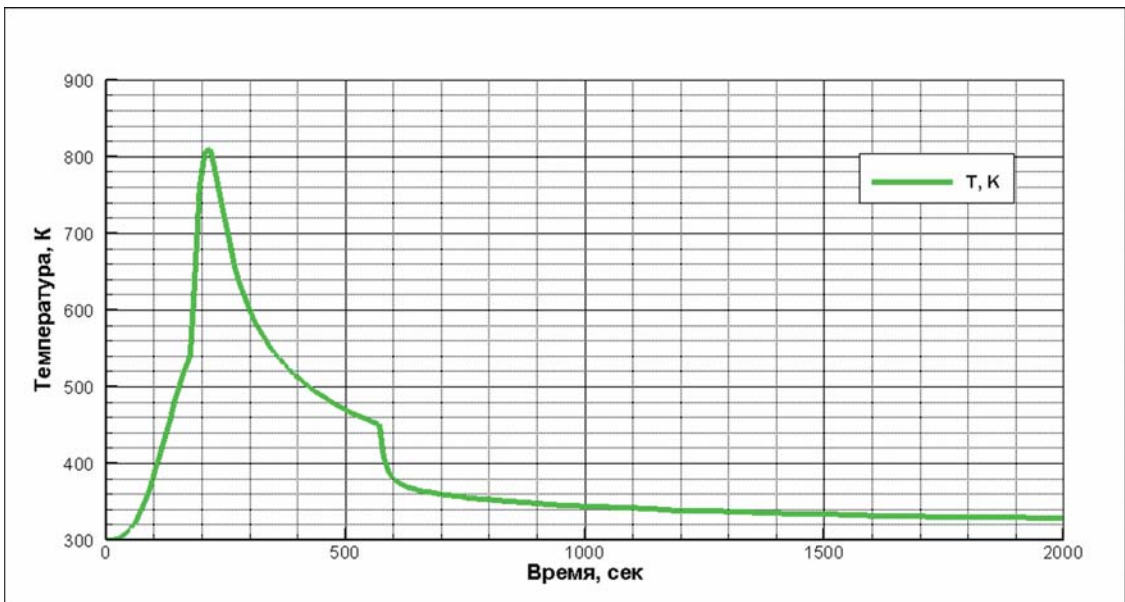


Рис. 4. Динамика среднеемкной абсолютной температуры при пожаре, К

Fig. 4. Dynamics of volume-averaged absolute temperature in case of fire, K

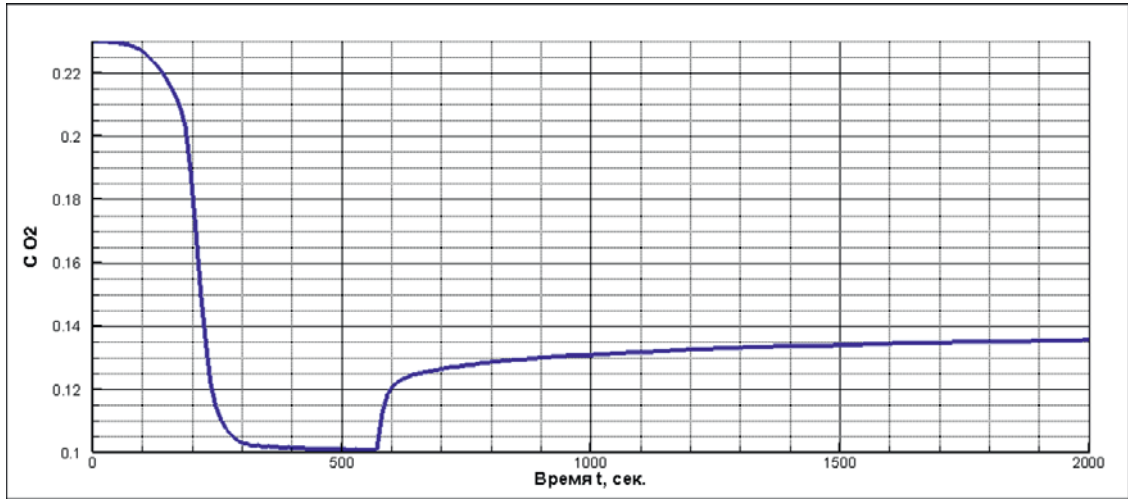


Рис. 5. Динамика изменения массовой концентрации кислорода
Fig. 5. Dynamics of oxygen mass concentration

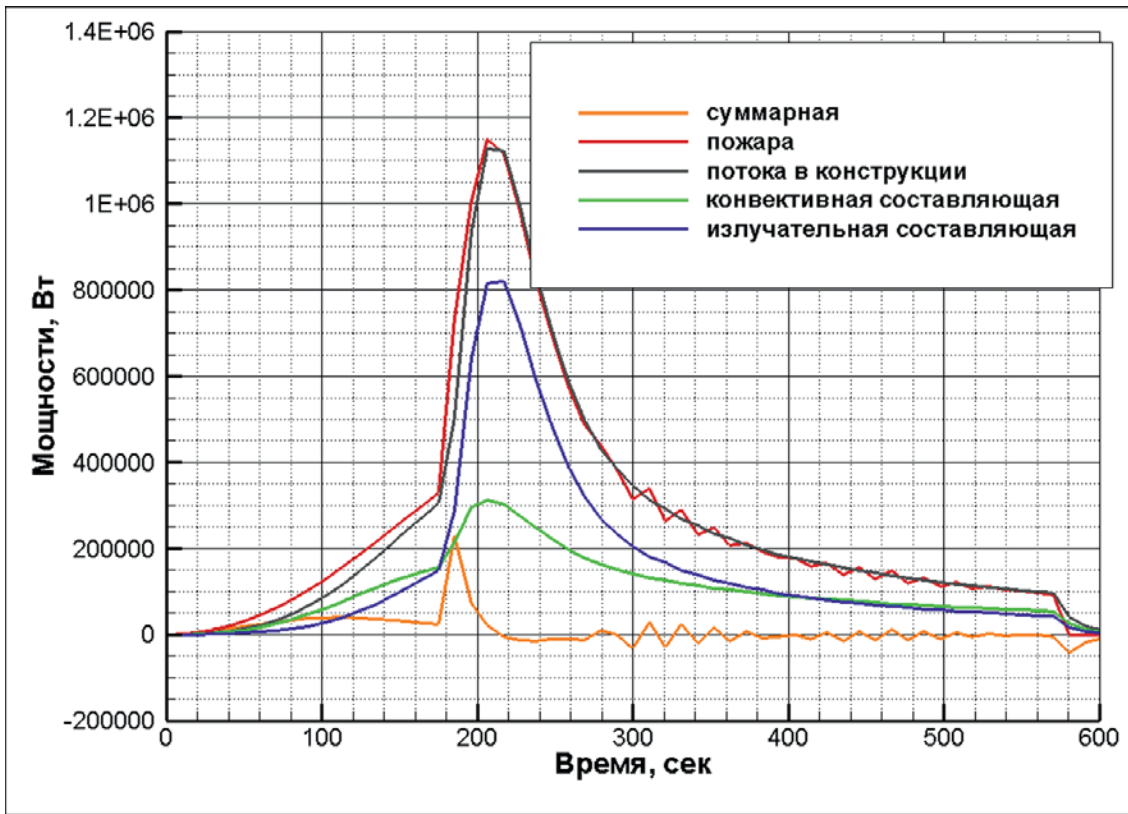


Рис. 6. Динамика изменения мощности энергетических потоков, Вт
Fig. 6. Dynamics of power flow capacity, W

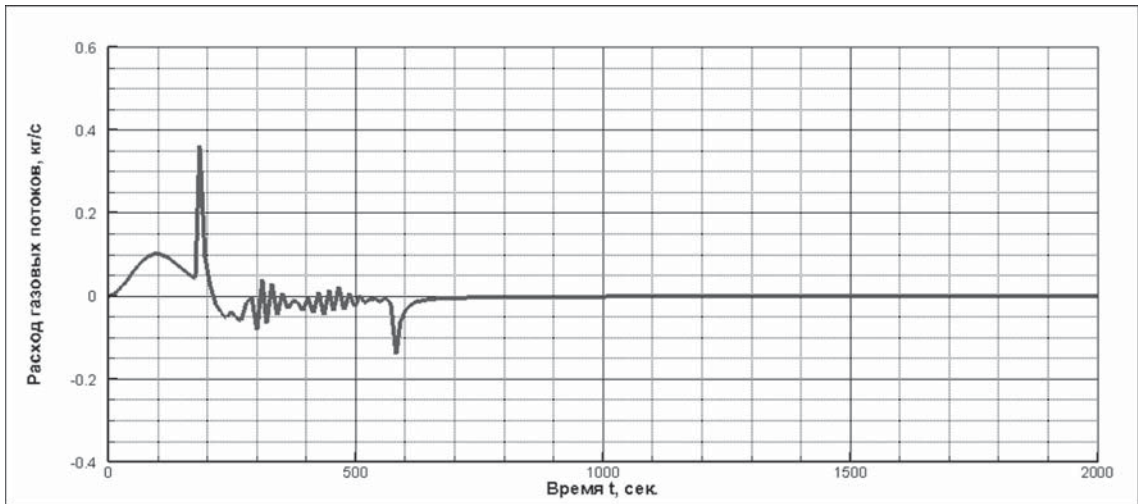


Рис. 7. Расход выходящего (входящего) через неплотности газового потока, кг/с

Fig. 7. Leak rate of outgoing (incoming) gas flow, kg/s

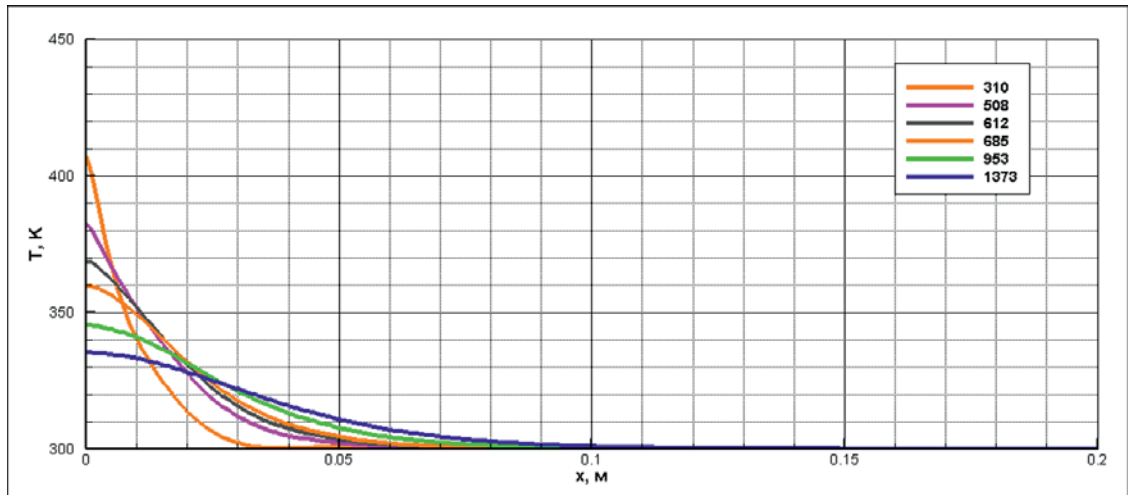


Рис. 8. Динамика распределения абсолютной температуры по сечению окружающих конструкций, К, время от начала пожара, с

Fig. 8. Dynamics of cross-section distribution of absolute temperature over surrounding structures, K, time from outbreak of fire, s

работ люке в перекрытии между транспортным въездом и вышележащим помещением, которое в свою очередь связано проемами с другими помещениями. Задача исследования – проанализировать распространение тепловых потоков на соседние помещения через открытый люк и проемы; определить максимальные температуры в соседних помещениях и оценить степень опасности пожара на автомобиле для оборудования, находящегося в связанных помещениях. Моделирование пожара ведется с использованием полевой модели.

В расчете предполагается непрерывный пролив и горение топлива и смазочного масла автомобиля в районе двигателя. Площадь горения принята около 4,2 м². Одновременный

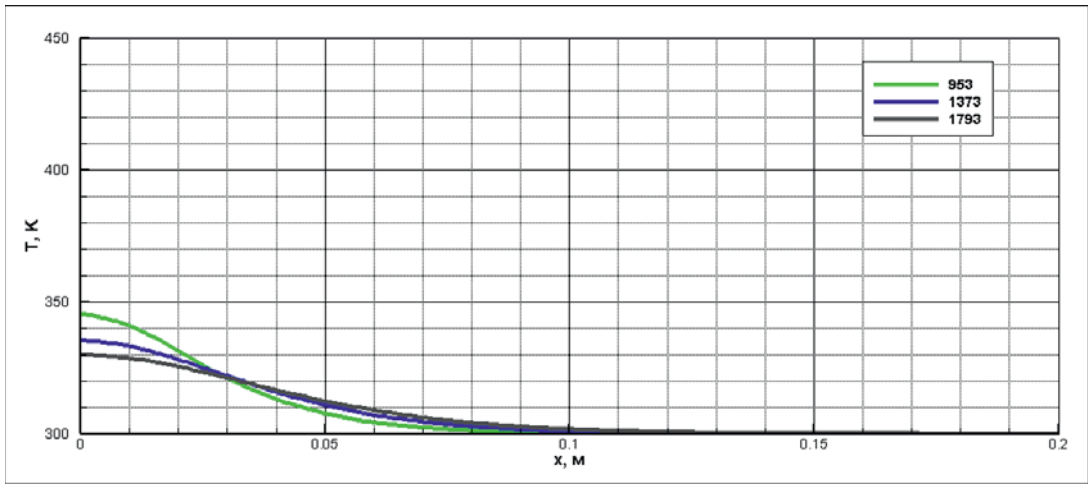


Рис. 9. Динамика распределения абсолютной температуры по сечению окружающих конструкций, К, время от начала пожара, с

Fig. 9. Dynamics of cross-section distribution of absolute temperature over surrounding structures, K, time from outbreak of fire, s

Таблица 1

Результаты моделирования пожара в кабельной шахте

Table 1

Results of cable duct fire modeling

Наименование помещения	Площадь, м²	Высота, м	Удельная пожарная нагрузка, МДж/м²	Максимальная температура поверхности конструкции, К	Время достижения максимальной температуры поверхности, с	Максимальная температура защитного слоя, К	Время достижения максимальной температуры защитного слоя, с	Время начала объемного пожара, с
Кабельная шахта № 4	6,0	3,6	4077,7	422	246	337	736	181

Таблица 2

Исходные данные по пожарным нагрузкам

Table 2

Input data on fire loads

Наименование пожарной нагрузки	Масса пожарной нагрузки, кг	Низшая теплота сгорания, МДж/кг
Дизельное топливо	249	43,59
Резина	846	43,89
Смазочные материалы	18	41,87
Пенополиуретан	4	24,3
Полиэтилен	1,8	47,14
Поливинилхлорид	2,6	14,31
Картон	2,5	13,4
Искусственная кожа	1,8	17,76

пролив большого количества топлива полагается менее опасным вследствие наличия в полу транспортного въезда устройств самотушения проливов легковоспламеняющейся жидкости. При сценарии с пролонгированным проливом топливо и смазочное масло обеспечивают роль высокоэнергетического источника горения и разжигания всех колес автомобиля. При этом колеса создают более высокий уровень пожарной нагрузки, чем само топливо. Начало распространения ОФП при одновременном загорании пролива и передних колес представлено на рис. 10.

Расчет пожара проводится для начальных условий: нормальное атмосферное давление, температура окружающей среды – 300 К. Условно, сеткой изолиниями и областями, имеющими температуру менее начальной окружающей среды, выделены конструкции и предметы, исключенные из теплового расчета. На границах данных областей со стороны расчетной области используются термические и газодинамические граничные условия.

На рис. 10–17 представлена динамика распространения поля абсолютной температуры, K , через различное время от начала горения всей площади пролива и колес на передней оси.

На рис. 18–25 показана динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания, K , через 2, 4, 8, 18, 38, 58, 118, 178, 238, 298, 538 с после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси.

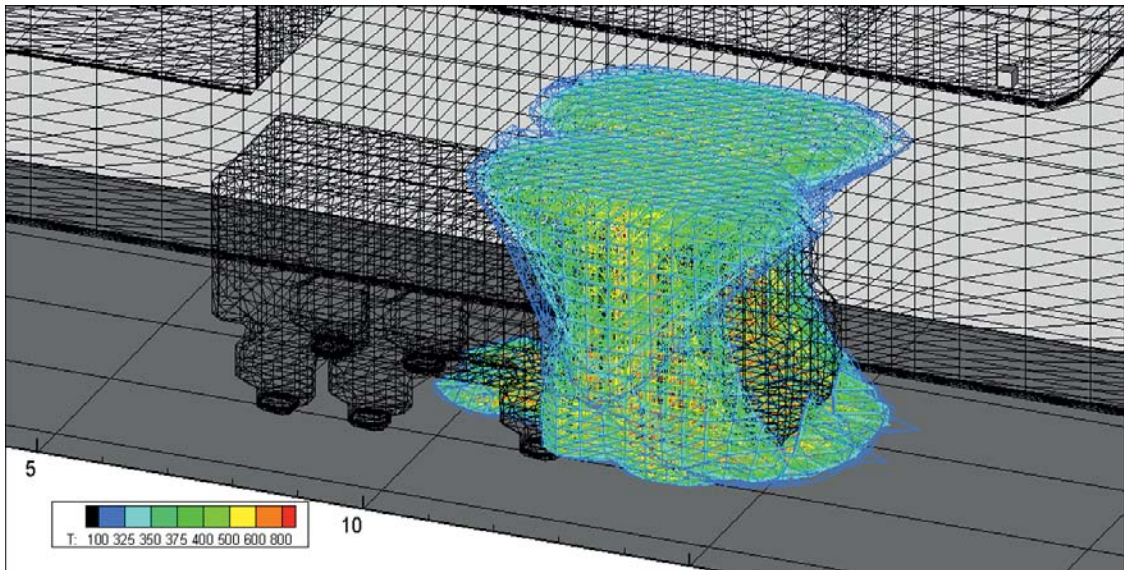


Рис. 10. Поле абсолютной температуры через несколько секунд после начала горения
Fig. 10. Absolute temperature field, few seconds after the outbreak

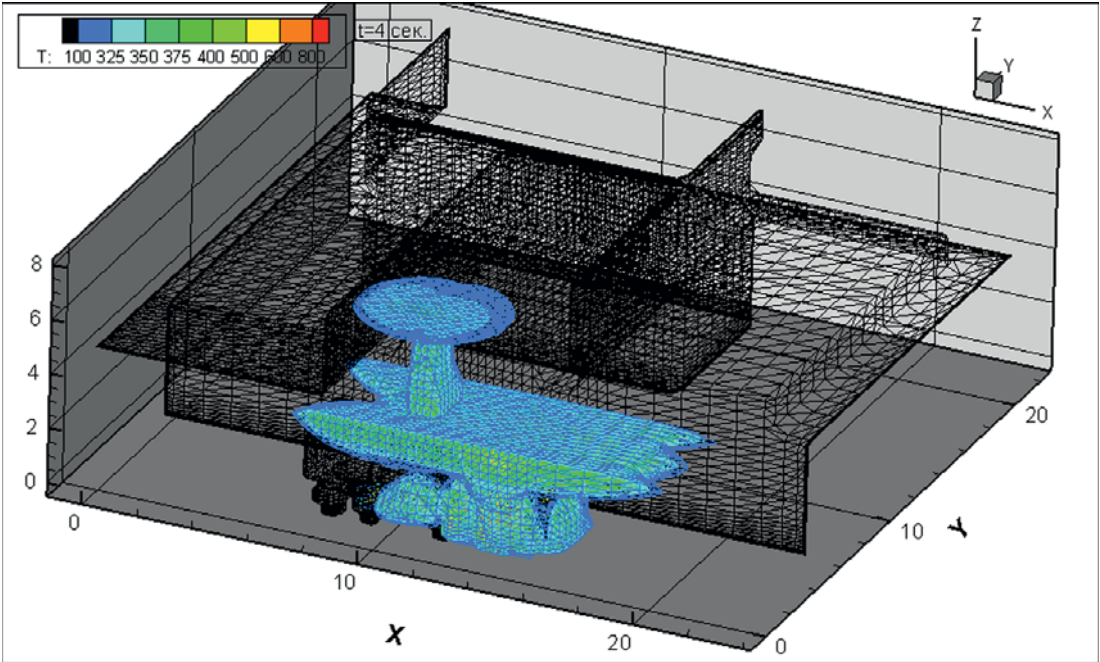


Рис. 11. Динамика распространения поля абсолютной температуры, К, через 4 секунды после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси
Fig. 11. Absolute temperature field, K, 4 seconds after the onset of burning at the whole spraying area and wheels on front axle

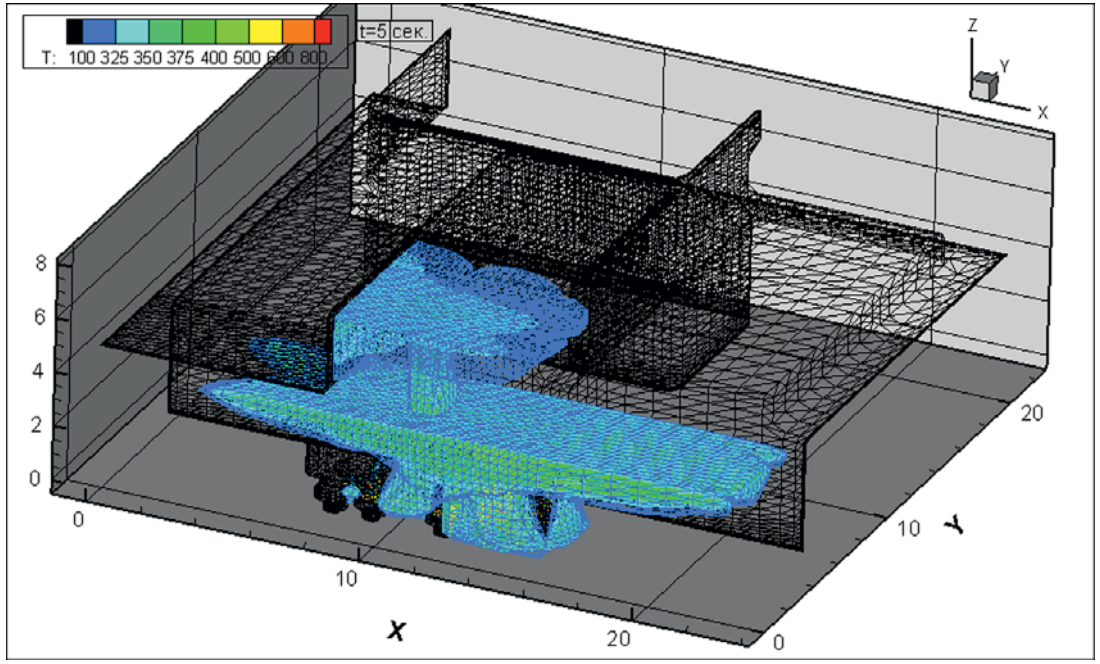


Рис. 12. Динамика распространения поля абсолютной температуры, К, через 5 секунд после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси
Fig. 12. Absolute temperature field, K, 5 seconds after the onset of burning at the whole spraying area and wheels on front axle

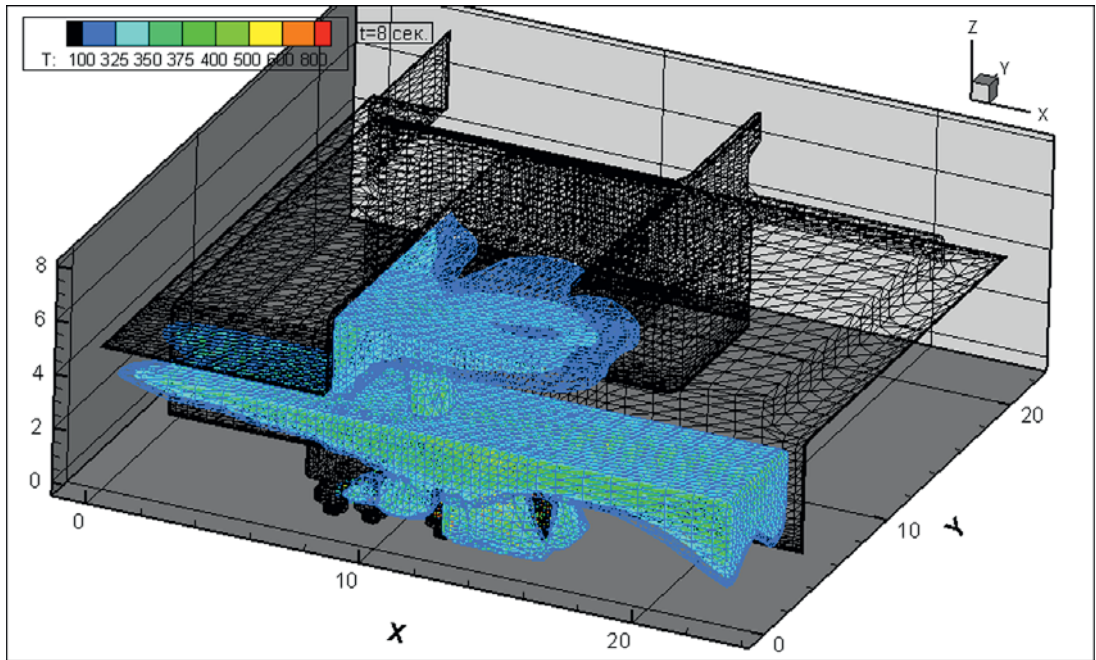


Рис. 13. Динамика распространения поля абсолютной температуры, K , через 8 секунд после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси

Fig. 13. Absolute temperature field, K , 8 seconds after the onset of burning at the whole spraying area and wheels on front axle

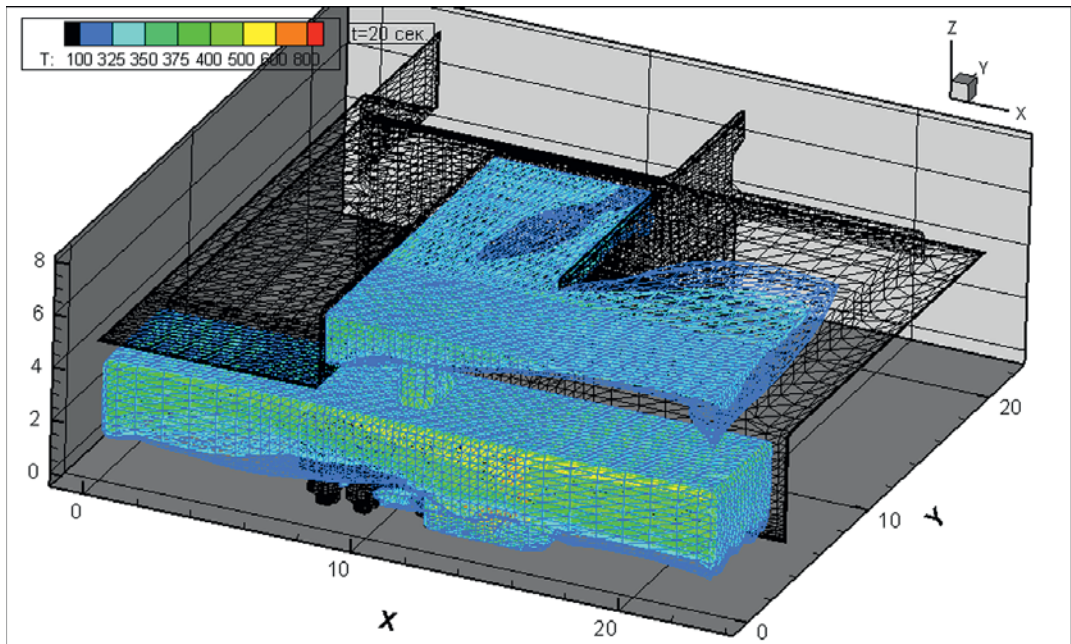


Рис. 14. Динамика распространения поля абсолютной температуры, K , через 20 секунд после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси

Fig. 14. Absolute temperature field, K , 20 seconds after the onset of burning at the whole spraying area and wheels on front axle

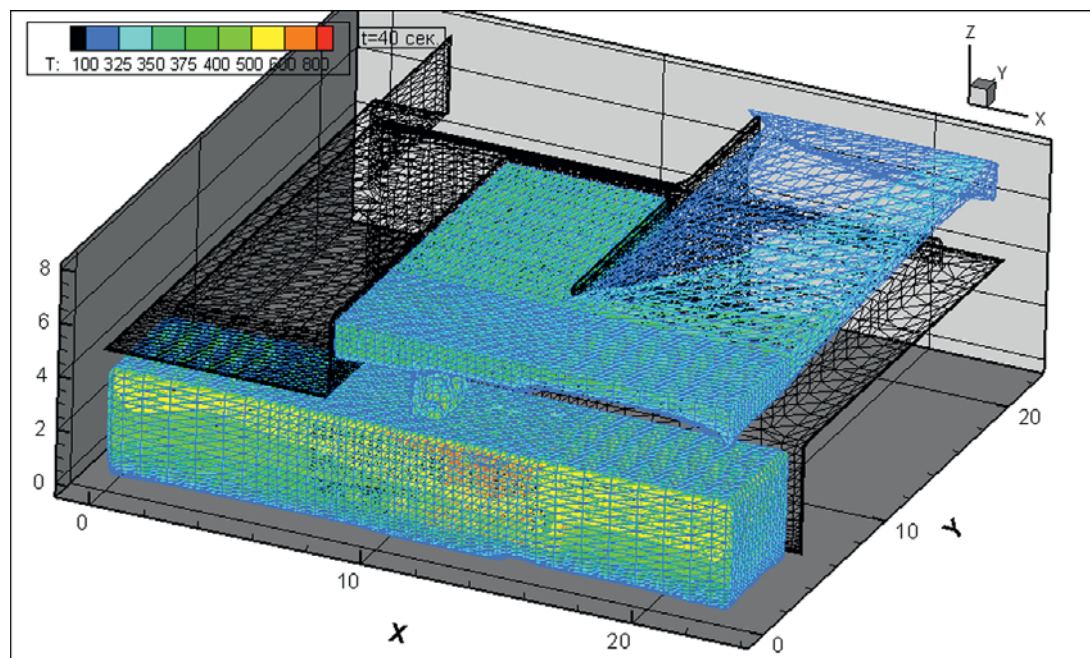


Рис. 15. Динамика распространения поля абсолютной температуры, K, через 40 секунд после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси
Fig. 15. Absolute temperature field, K, 40 seconds after the onset of burning at the whole spraying area and wheels on front axle

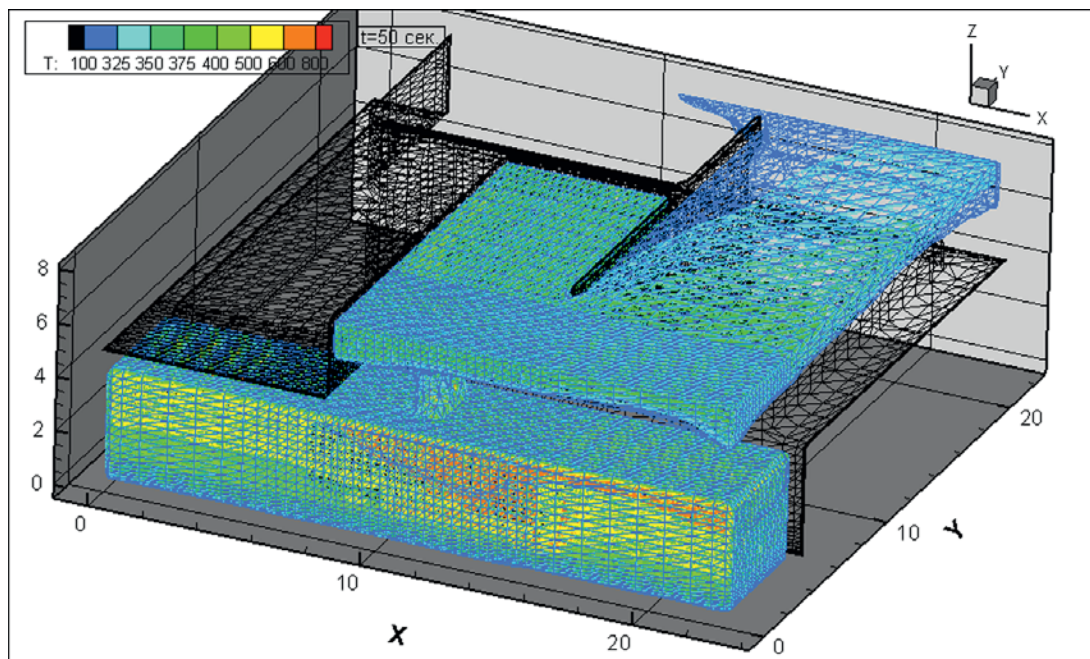


Рис. 16. Динамика распространения поля абсолютной температуры, K, через 50 секунд после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси
Fig. 16. Absolute temperature field, K, 50 seconds after the onset of burning at the whole spraying area and wheels on front axle

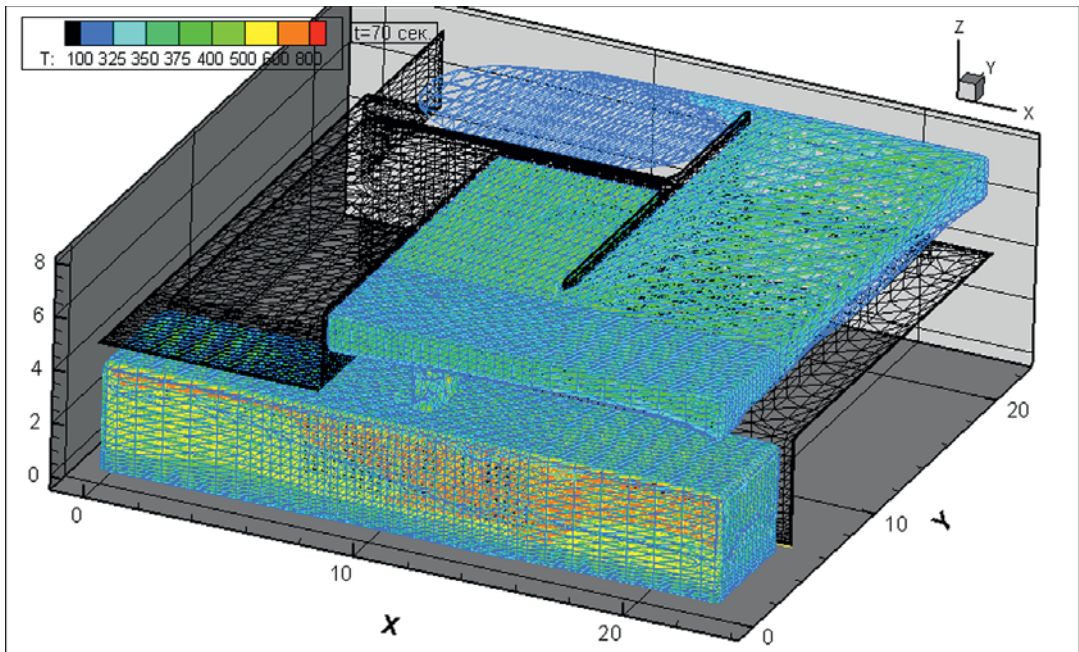


Рис. 17. Динамика распространения поля абсолютной температуры, К, через 70 секунд после начала горения всей площади пролива и колес на передней оси

Fig. 17. Absolute temperature field, K, 70 seconds after the onset of burning at the whole spraying area and wheels on front axle

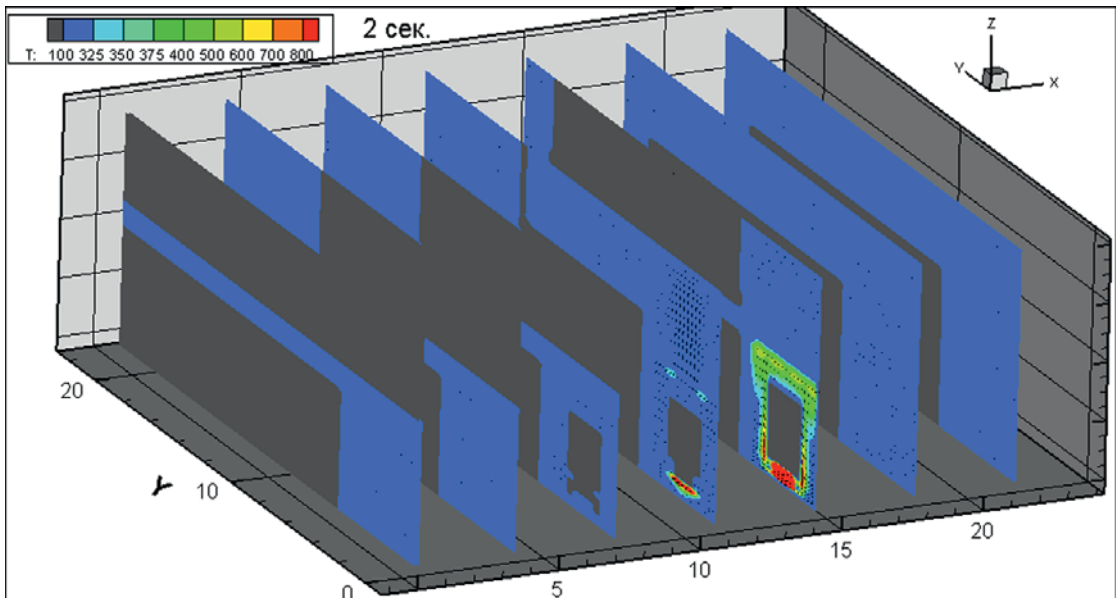


Рис. 18. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 2 секунды после начала горения, К

Fig. 18. Absolute temperature field cross section, 2 seconds after the onset of burning, K

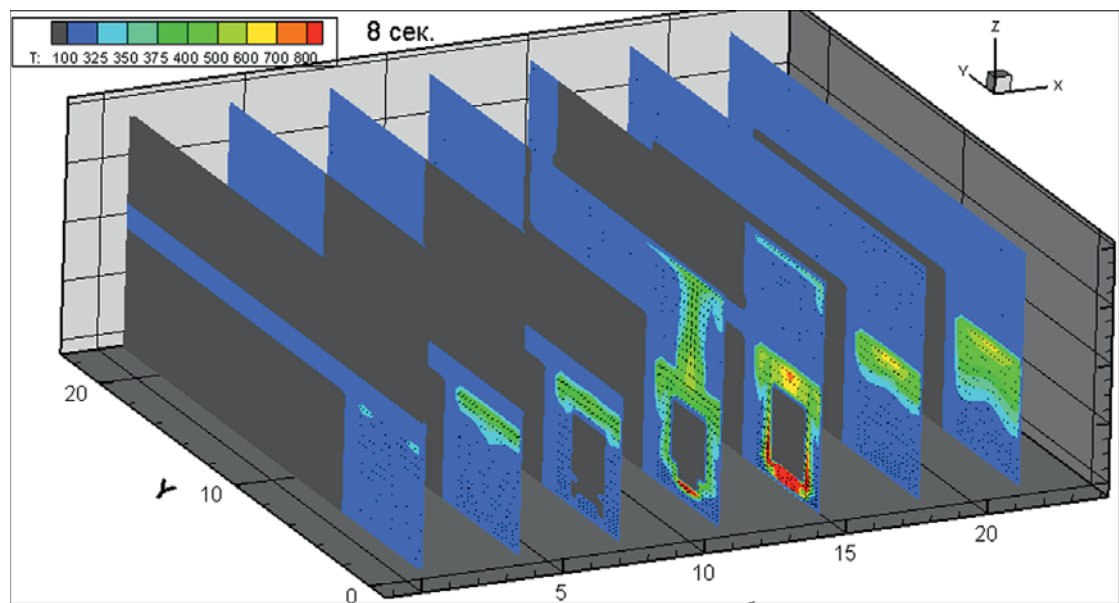


Рис. 19. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 8 секунд после начала горения, K

Fig. 19. Absolute temperature field cross section, 8 seconds after the onset of burning, K

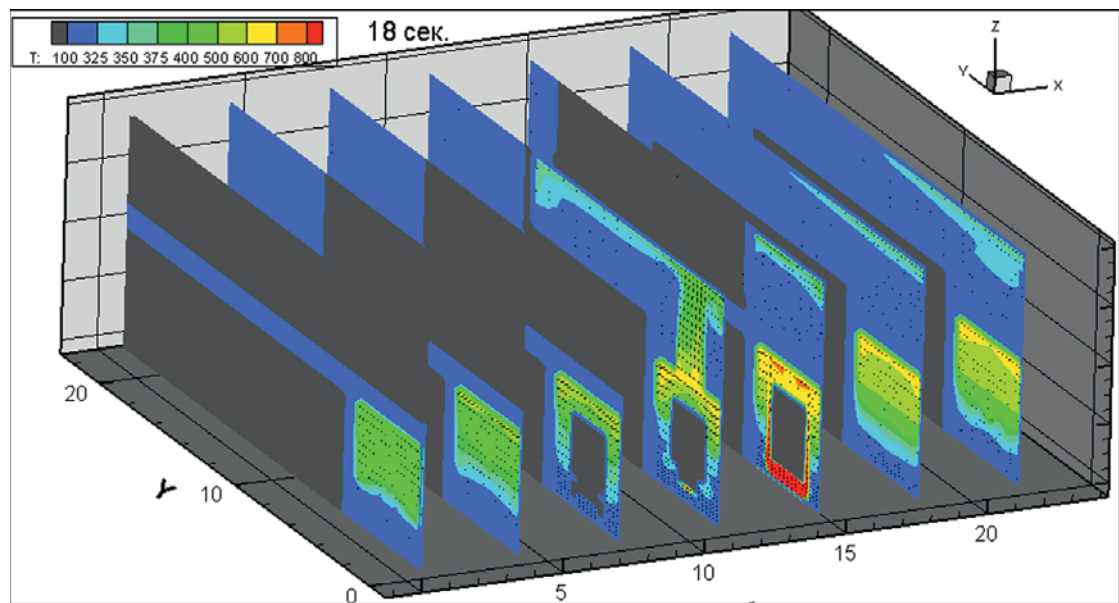


Рис. 20. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 18 секунд после начала горения, K

Fig. 20. Absolute temperature field cross section, 18 seconds after the onset of burning, K

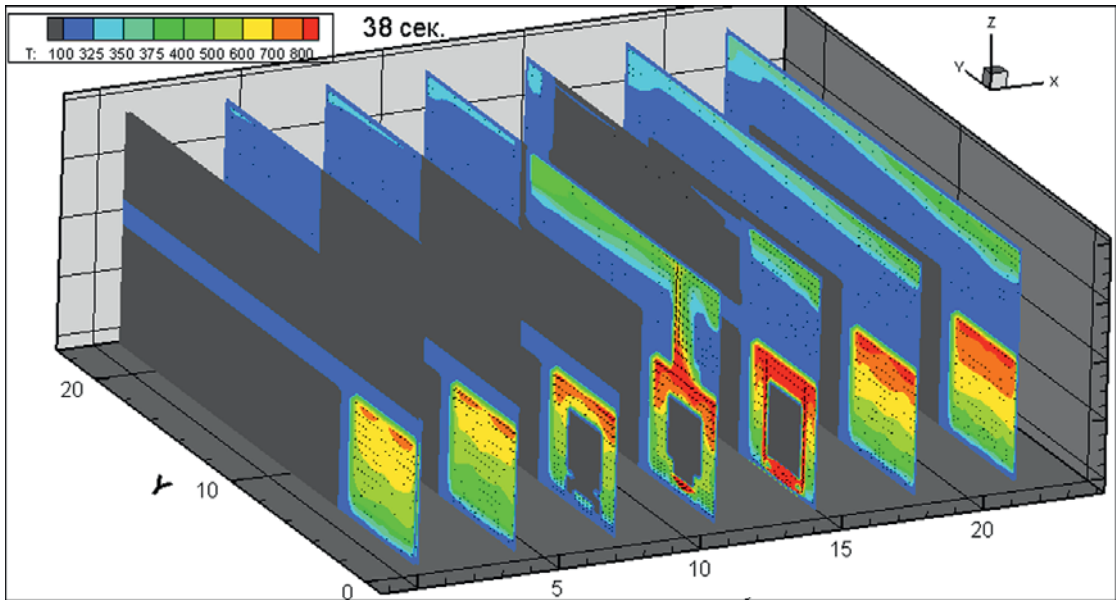


Рис. 21. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 38 секунд после начала горения, K

Fig. 21. Absolute temperature field cross section, 38 seconds after the onset of burning, K

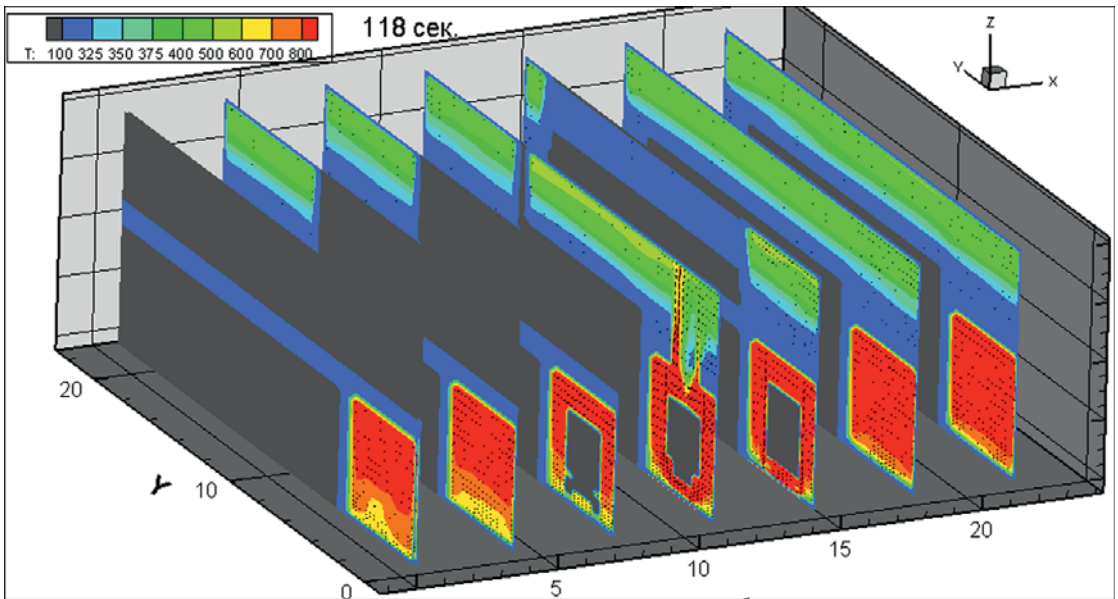


Рис. 22. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 118 секунд после начала горения, K

Fig. 22. Absolute temperature field cross section, 118 seconds after the onset of burning, K

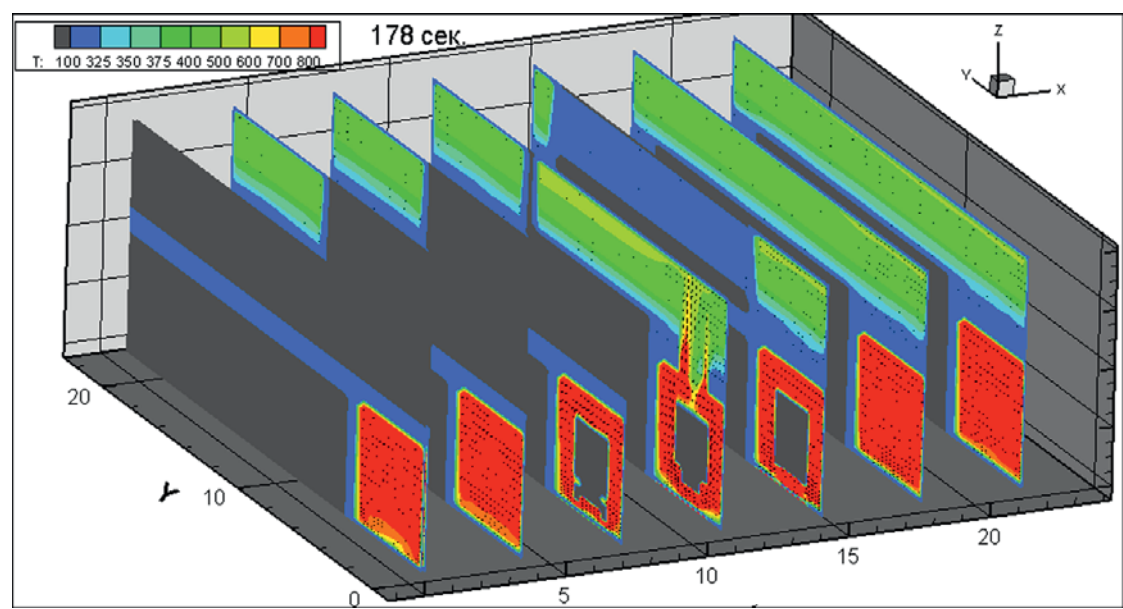


Рис. 23. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 178 секунд после начала горения, K

Fig. 23. Absolute temperature field cross section, 178 seconds after the onset of burning, K

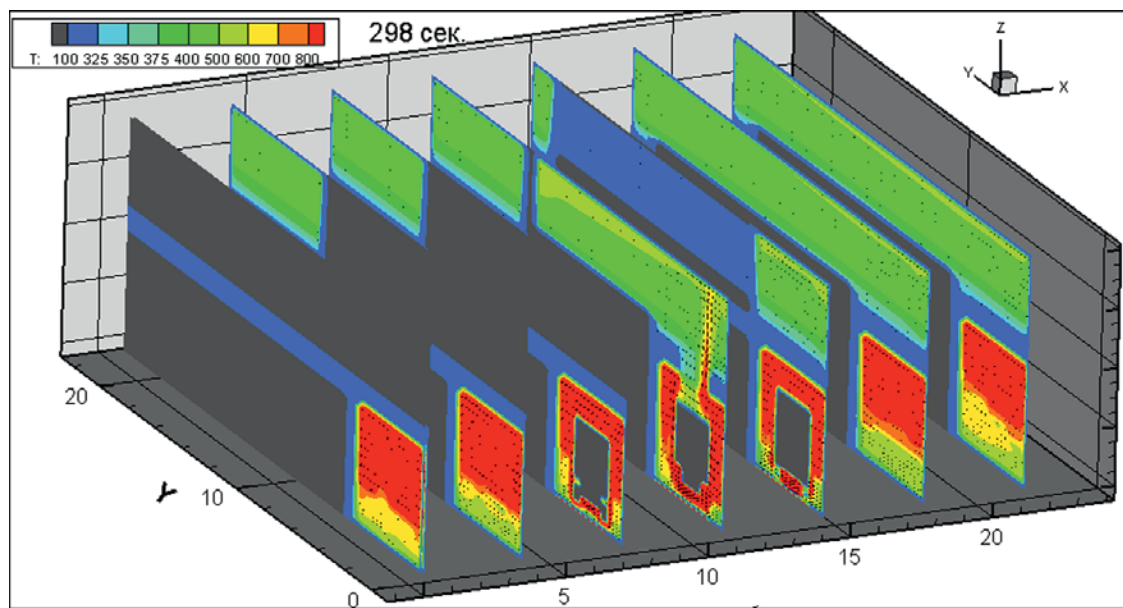


Рис. 24. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 298 секунд после начала горения, K

Fig. 24. Absolute temperature field cross section, 298 seconds after the onset of burning, K

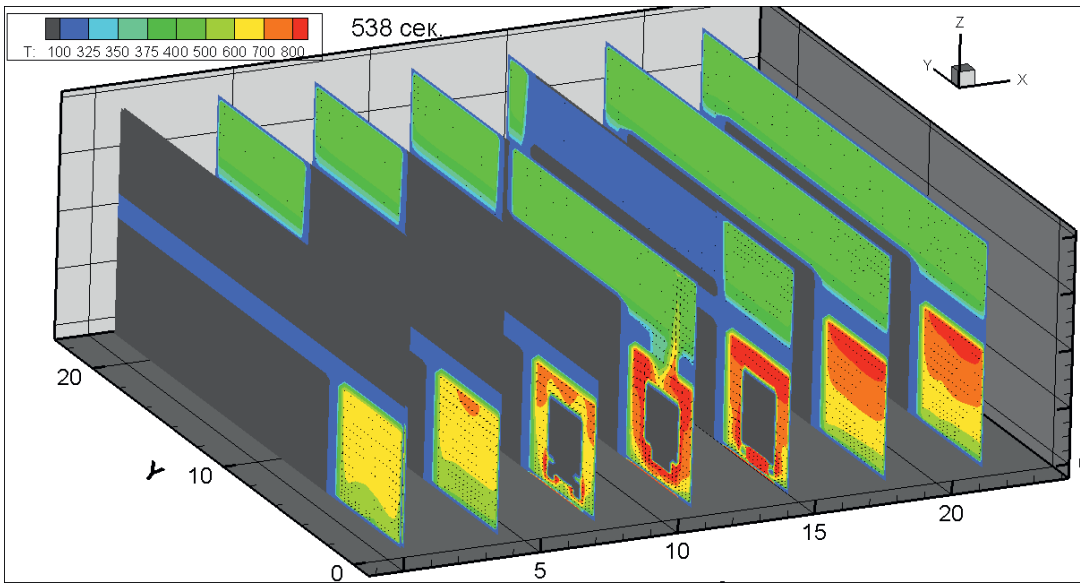


Рис. 25. Динамика распространения поля абсолютной температуры по сечению здания через 538 секунд после начала горения, K

Fig. 25. Absolute temperature field cross section, 538 seconds after the onset of burning, K

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 АС, осуществлена ее реализация в рамках комплекса программного обеспечения Fire Dynamics.

2. Разработан и верифицирован комплекс программного обеспечения, позволяющий проводить расчеты с использованием полевой модели динамики пожара.

3. По мнению авторов статьи, возможно применение полевой модели динамики пожара для проведения расчетов пожара в зданиях и помещениях различного назначения.

4. 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, в том числе и при углеводородном температурном режиме (при горении углеводородного топлива), например для складов с горюче-смазочными материалами.

Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов, поскольку он основан на решении уравнений в частных производных, выражающих фундаментальные законы сохранения в каждой точке расчетной области. С его помощью можно рассчитать температуру, скорость, концентрации компонентов смеси и т. д. в каждой точке расчетной области. В связи с этим полевой метод может широко использоваться для выявления закономерностей развития пожара в помещениях различного назначения.

Список литературы

1. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации. Москва: ВНИИПО; 2003.
2. Пуцев Д.И. Методика анализа влияния пожара на ядерную и радиационную безопасность АЭС [диссертация]. Москва: ВНИИПО; 2001.
3. ГОСТ Р 12.3.047-2012. Система стандартов безопасности труда. Пожарная безопасность технологических процессов. Общие требования. Методы контроля. Москва: Стандартинформ; 2014.
4. Болодьян И.А., Бородкин А.Н., Карпов А.В., Пуцев Д.И. Развитие полевого метода моделирования пожара в помещениях. В: Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России. Москва: ВНИИПО; 2007, с. 54–121.
5. Верификация трехмерной математической модели расчета динамики пожара для оценки воздействия пожара на оборудование АЭС. Москва: ООО «СТЭМ»; 2001. Арх. № Ф-17204, № Ф-17409, № Ф-17486.
6. 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.secnrs.ru/upload/files/rd2000.pdf>
7. РД 03-33-2008. Инструкция об организации проведения экспертизы программных средств, применяемых при обосновании и (или) обеспечении безопасности объектов использования атомной энергии [интернет]. Режим доступа: <https://gostrf.com/normadata/1/4293832/4293832652.pdf>
8. Пуцев Д.И. Методы, рекомендуемые для дальнейшего анализа пожарной безопасности 4-го энергоблока Кольской АЭС. Краткая характеристика и некоторые результаты применения расчетных методов. В: Методы пожарной опасности российских АЭС. Материалы международного семинара. Москва: ВНИИАЭС; 2000.
9. Исследования развития пожаров в помещениях АЭС с целью определения прогресса строительных конструкций в условиях пожара. Отчет о научно-исследовательской работе. Москва: ВНИИПО; 1985.
10. Провести исследования и разработать рекомендации по повышению устойчивости функционирования управляющих систем защиты ядерных реакторов АСТ от воздействия опасных факторов пожара. Отчет о НИР. Москва: ВНИИПО; 1989.
11. Молчадский И.С., Бородкин А.Н. Тепловыделение при пожарах в помещениях. Пожаровзрывобезопасность. 1992;1(1):41–45.
12. Борисов В.Н., Пуцев Д.И., Угорелов В.А. Общие требования к противопожарной защите атомных станций. В: Проблемы горения и тушения на рубеже веков. Материалы XV научно-практической конференции. Москва: ВНИИПО; 1999.
13. Борисов В.Н., Пуцев Д.И., Угорелов В.А. Методика оценки теплового воздействия пожара на оборудование АЭС. В: Проблемы горения и тушения на рубеже веков. Материалы XV научно-практической конференции. Москва: ВНИИПО; 1999.
14. Глухов И.С., Пуцев Д.И. Результаты предварительного зонирования 4-го энергоблока Кольской АЭС. В: Методы пожарной опасности российских АЭС. Материалы международного семинара. Москва: ВНИИАЭС; 2000.
15. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Андреев В.В., Козлов Ю.И. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Москва: Академия ГПС МЧС России; 2012.
16. Лобанова Н.А., Пуцев Д.И., Томилин А.В., Хасанов И.Р. Обеспечение пожарной безопасности энергоблоков АЭС нового поколения. В: Актуальные проблемы пожарной безопасности: XXI международная научно-практическая конференция. Тезисы докладов – 4.1. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России; 2009, с. 105–108.
17. Хасанов И.Р., Голованов В.И. Развитие методов исследования огнестойкости и пожарной опасности строительных конструкций и инженерного оборудования. В: Юбилейный сборник трудов ФГУ ВНИИПО МЧС России. Москва: ВНИИПО; 2007, с. 121–158.
18. Болодьян И.А., Нигоренко Н.В., Пуцев Д.И., Терехов И.В. Анализ безопасности энергоблока с реактором ВВЭР-440 при возникновении пожара в машинном зале и кабельных помещениях систем расхолаживания реакторной установки. В: Снижение риска гибели людей при пожарах. Материалы XVIII Науч.-практ. конф. Москва: ВНИИПО; 2003.
19. Борисов В.Н., Пуцев Д.И., Томилин А.В. Методика вероятностного анализа безопасности АЭС при пожаре. В: Актуальные проблемы пожарной безопасности: XXI международная научно-практическая конференция. Тезисы докладов – 4.1. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России; 2009, с. 108–111.

20. Борисов В.Н., Пуцев Д.И., Томилин А.В. Методика определения пожарных зон, влияющих на безопасность. В: Актуальные проблемы пожарной безопасности. Материалы XXII международной научно-практической конференции. Москва: ВНИИПО; 2010. с. 32–38.
21. Борисов В.Н., Пуцев Д.И., Томилин А.В. Определение частоты возникновения пожара в выбранных пожарных зонах АЭС. В: Актуальные проблемы пожарной безопасности. Материалы XXII международной научно-практической конференции. Москва: ВНИИПО; 2010. с. 279–283.
22. Пуцев Д.И. Специальные требования пожарной безопасности для атомных станций. Пожарная безопасность. 2010;(3):138–140.
23. Дешевых Ю.И., Гилетич А.Н., Комков П.М., Пуцев Д.И., Томилин А.В. Развитие системы нормирования пожарной безопасности атомных станций. Пожарная безопасность. 2011;(3):66–70.
24. СП 13.13130.2009. Атомные станции. Требования пожарной безопасности. Москва: ФГУ ВНИИПО МЧС России; 2009.
25. Рекомендации по оценке пожароуязвимости систем (элементов), важных для безопасности, на Российских АЭС. Москва: ВНИИАЭС; 2000.
26. Ingberg S.H. Tests of the Severity of Building Fires. NFPA Quarterly. 1928;22(1):43–61.
27. Молчадский И.С. Приведение температурного режима пожара к стандартному. В: Огнестойкость строительных конструкций: сб. тр. Москва: ВНИИПО; 1979, Вып. 7, с. 3–7.
28. Молчадский И.С., Зотов С.В. Расчет требуемого предела огнестойкости и допустимой пожарной нагрузки железобетонных колонн. В: Огнестойкость строительных конструкций: сб. научных трудов. Москва: ВНИИПО; 1984, с. 50–65.
29. Алексашенко А.В., Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Тепломассоперенос при пожаре. Москва: Стройиздат; 1982.
30. Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения. Рекомендации. Москва: ВНИИПО; 1988.
31. Болодьян А.А., Глухов И.С., Пуцев Д.И. Математическое моделирование переноса газо-аэрозольных смесей в объеме помещения. В: Научно-техническое обеспечение противопожарных и аварийно-спасательных работ. Материалы XII научно-практической конференции. Москва: ВНИИПО; 1993, с. 164–165.
32. Борисов В.Н., Пуцев Д.И., Угорелов В.А. Методика оценки теплового воздействия пожара на оборудование АЭС. В: Проблемы горения и тушения пожаров на рубеже веков. Материалы XV научно-практической конференции. Москва: ВНИИПО; 1999.
33. Карпов А.В., Рыжов А.М. Рекомендации по применению полевого метода математического моделирования пожара. Москва: ВНИИПО; 2002.
34. Руководство по расчету температурного режима пожара в помещениях жилых зданий. Москва: ВНИИПО; 1983.
35. Гутов В.Н. Зонная математическая модель развитой стадии пожара. В: Безопасность людей при пожарах в зданиях и сооружениях: сб. науч. трудов. Москва: ВНИИПО МВД СССР; 1987, с. 62–69.
36. Гутов В.Н., Лицкевич В.В. Математическая модель пламенного горения в здании. Пожаровзрывобезопасность. 1994;3(4):58–65.
37. Молчадский И.С., Астахова И.Ф. Математическая модель температурных полей начальной стадии пожара в помещении. Пожаровзрывобезопасность. 1995;4(2):31–33.
38. Молчадский И.С., Зернов С.И. Определение продолжительности начальной стадии пожара. В: Пожарная профилактика: сб. научных трудов. Москва: ВНИИПО; 1981, с. 26–45.
39. Зотов С.В. Эквивалентная продолжительность пожара для железобетонных конструкций в зданиях химических производств [диссертация]. Москва; 1991.

References

1. Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires: Methodological recommendations. Moscow: VNIIPO; 2003. (In Russian).
2. *Putsev D.I.* Methodology for analyzing the impact of fire on nuclear and radiation safety of nuclear power plants [dissertation]. Moscow: VNIIPO; 2001. (In Russian).
3. State Standard R 12.3.047-2012. Occupational safety standards system. Fire safety of technological processes. General requirements. Methods of control. Moscow: Standartinform; 2014. (In Russian).
4. *Bolodyan I.A., Borodkin A.N., Karpov A.B., Putsev D.I.* Development of the field method of fire modeling in premises. In: Anniversary collection of works of the Federal State Institution VNIIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow: VNIIPO; 2007, pp. 54–121. (In Russian).
5. Verification of a three-dimensional mathematical model for calculating fire dynamics to assess the impact of fire on NPP equipment. Moscow: LLC “STEM”; 2001. Arch. No. F-17204, No. F-17409, No. F-17486. (In Russian).
6. 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).
7. RD 03-33-2008. Instruction on the organization of the examination of software tools used in the justification and (or) ensuring the safety of facilities for the use of atomic energy [internet]. Available at: <https://gostrf.com/normadata/1/4293832/4293832652.pdf> (In Russian).
8. *Putsev D.I.* Methods recommended for further analysis of fire safety of the 4th power unit of the Kola NPP. A brief description and some results of the application of computational methods. In: Fire hazard methods of Russian nuclear power plants. Materials of the international seminar. Moscow, VNIIAES; 2000. (In Russian).
9. Studies of the development of fires in the premises of nuclear power plants in order to determine the heating of building structures in fire conditions. Report on research work. Moscow: VNIIPO; 1985. (In Russian).
10. To conduct research and develop recommendations to improve the stability of the functioning of control systems for the protection of AST nuclear reactors from the effects of fire hazards. Research report. Moscow: VNIIPO; 1989. (In Russian).
11. *Molchadsky I.S., Borodkin A.N.* Heat release during indoor fires. *Pozharovzryvobezopasnost* = Fire and Explosion Safety. 1992;1(1):41–45. (In Russian).
12. *Borisov V.N., Putsev D.I., Ugorelov V.A.* General requirements for fire protection of nuclear power plants. In: Problems of gorenje and extinguishing at the turn of the century. Materials of the XV scientific and practical conference. Moscow: VNIIPO; 1999. (In Russian).
13. *Borisov V.N., Putsev D.I., Ugorelov V.A.* Methodology for assessing the thermal impact of fire on NPP equipment. In: Problems of gorenje and extinguishing at the turn of the century. Materials of the XV scientific and practical conference. Moscow: VNIIPO; 1999. (In Russian).
14. *Glukhov I.S., Putsev D.I.* Results of preliminary zoning of the 4th power unit of the Kola NPP. In: Methods of fire hazard of Russian nuclear power plants. Materials of the international seminar. Moscow: VNIIAES; 2000. (In Russian).
15. *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).
16. *Lobanova H.A., Putsev D.I., Tomilin A.B., Khasanov I.R.* Ensuring fire safety of new generation NPP power units. In: Actual problems of fire safety. XXI International scientific and practical conference. Abstracts of reports – 4.1. Moscow: FSU VNIIPO EMERCOM of Russia; 2009, pp. 105–108. (In Russian).
17. *Khasanov I.R., Golovanov V.I.* Development of methods for studying fire resistance and fire hazard of building structures and engineering equipment. In: Anniversary collection of works of the Federal State Institution VNIIPO of the Ministry of Emergency Situations of Russia. Moscow: VNIIPO; 2007, pp. 121–158. (In Russian).
18. *Bolodyan I.A., Nigorenko N.V., Putsev D.I., Terekhov I.V.* Safety analysis of a power unit with a VVER-440 reactor in the event of a fire in the engine room and cable rooms of reactor cooling systems. In: Reducing the risk of loss of life in fires. Report at the XVIII Scientific and Technical Conference on the topic. Moscow: VNIIPO OF the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation; 2003. (In Russian).
19. *Borisov V.N., Putsev D.I., Tomilin A.B.* Methods of probabilistic analysis of NPP safety in case of fire. In: Actual problems of fire safety. XXI International scientific and practical conference. Abstracts of reports – 4.1. Moscow: FSU VNIIPO EMERCOM of Russia; 2009, pp. 108–111. (In Russian).

20. *Borisov V.N., Putsev D.I., Tomilin A.V.* Methodology for determining fire zones affecting safety. In: Actual problems of fire safety. Materials of the XXII International scientific and practical conference. Moscow: VNIPO; 2010, pp. 32–38. (In Russian).
21. *Borisov V.N., Putsev D.I., Tomilin A.V.* Determination of the frequency of fire occurrence in selected fire zones of nuclear power plants. Actual problems of fire safety. Materials of the XXII International scientific and practical conference. Moscow: VNIPO; 2010, pp. 279–283. (In Russian).
22. *Putsev D.I.* Special fire safety requirements for nuclear power plants. *Pozharnaya bezopasnost' = Fire safety.* 2010;(3):138–140. (In Russian).
23. *Deshykh Yu.I., Giletich A.N., Komkov P.M., Putsev D.I., Tomilin A.B.* Development of the fire safety rationing system of nuclear power plants. *Pozharnaya bezopasnost' = Fire safety.* 2011;(3):66–70. (In Russian).
24. SP 13.13130.2009. Nuclear power plants. Fire safety requirements. Moscow: VNIPO OF the Ministry of Emergency Situations of the Russian Federation; 2009. (In Russian).
25. Recommendations for assessing the fire resistance of systems (elements) important for safety at Russian nuclear power plants. Moscow: VNIIAES; 2000. (In Russian).
26. *Ingberg S.H.* Tests of the Severity of Building Fires. National Fire Protection Assoc. NFPA Quarterly. 1928;22(1):43–61.
27. *Molchadsky I.S.* Bringing the temperature regime of the fire to the standard. In: Fire resistance of building structures. Collection of works. Moscow: VNIPO; 1979, Issue 7, pp. 3–7. (In Russian).
28. *Molchadsky I.S., Zotov S.V.* Calculation of the required limit of fire resistance and permissible fire load of reinforced concrete columns. In: Fire resistance of building structures. Collection of scientific works. Moscow: VNIPO; 1984, pp. 50–65. (In Russian).
29. *Aleksashenko A.V., Koshmarov Yu.A., Molchadsky I.S.* Heat and mass transfer in case of fire. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1982. (In Russian).
30. Methods for calculating the temperature regime of fire in the premises of buildings for various purposes. Recommendations. Moscow: VNIPO; 1988. (In Russian).
31. *Bolodyan A.A., Glukhov I.S., Putsev D.I.* Mathematical modeling of the transfer of gas-aerosol mixtures in the volume of the room. In: Scientific and technical support of fire-fighting and rescue operations. Materials of the XII scientific and practical conference. Moscow: VNIPO; 1993, pp. 164–165. (In Russian).
32. *Borisov V.N., Putsev D.I., Ugorelov V.A.* Methodology for assessing the thermal impact of fire on NPP equipment. In: Problems of gorenje and extinguishing at the turn of the century. Materials of the XV scientific and practical conference. Moscow: VNIPO; 1999. (In Russian).
33. *Karpov A.V., Ryzhov A.M.* Recommendations for the use of the field method of mathematical modeling of fire. Moscow: VNIPO; 2002. (In Russian).
34. Manual for calculating the temperature regime of fire in residential buildings. Moscow: VNIPO; 1983. (In Russian).
35. *Gutov V.N.* Zone mathematical model of the developed stage of fire. In: Safety of people during fires in buildings and structures: collection of scientific works. Moscow: VNIPO of the Ministry of Internal Affairs of the USSR; 1987, pp. 62–69. (In Russian).
36. *Gutov V.N., Litskevich V.V.* Mathematical model of flame gorenje in the building. *Pozharovzryvbezopasnost = Fire and Explosion Safety.* 1994;3(4):58–65. (In Russian).
37. *Molchadsky I.S., Astakhova I.F.* Mathematical model of temperature fields of the initial stage of a fire in a room. *Pozharovzryvbezopasnost = Fire and Explosion Safety.* 1995;4(2):31–33. (In Russian).
38. *Molchadsky I.S., Zernov S.I.* Determination of the duration of the initial stage of the fire. In: Fire prevention. Collection of scientific papers. Moscow: VNIPO; 1981, pp. 26–45. (In Russian).
39. *Zotov S.V.* Equivalent duration of fire for reinforced concrete structures in chemical production buildings [dissertation]. Moscow; 1991. (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), General Director of Scientific and Technical Centre "Industrial and Fire Safety" (NTC PPB), Balashikha
e-mail: ntcpb@mail.ru

Юрий Владимирович Кривцов, д-р техн. наук, руководитель научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: krivtsov.cniisk@mail.ru

Yuri V. Krivtsov, Dr. Sci. (Engineering), Head of Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: krivtsov.cniisk@mail.ru

Юрий Михайлович Грошев✉, канд. техн. наук, ведущий специалист научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: groshev52@gmail.com

Yuri M. Groshev✉, Cand. Sci. (Engineering), Leading Specialist, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: groshev52@gmail.com

Нина Александровна Лобанова, канд. техн. наук, главный специалист АО «Атомэнергoproект», Санкт-Петербург
e-mail: Nina.Lobanova1@mail.ru

Nina A. Lobanova, Cand. Sci. (Engineering), Chief Specialist, JSC Atomenergoproekt, St. Petersburg
e-mail: Nina.Lobanova1@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.072.2.014

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-71-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-71-83)

EDN: FARWIB

ЭКОНОМИЯ СТАЛИ В КОЛОННЕ ПРОМЫШЛЕННОГО ЗДАНИЯ ПРИ УЧЕТЕ ВЛИЯНИЯ ЖЕСТКОСТИ ПОДКРАНОВОЙ БАЛКИ

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

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. Строительная наука всегда стремится к экономии материала, в том числе и при проектировании каркасов из стали. В настоящее время в современных строительных нормах расчет каркаса промышленного здания, а именно его колонн, ведется без учета жесткости подкрановой балки, воспринимающей нагрузку от мостового крана. Влияние этого фактора может дать определенную экономию металла, т. к. жесткость подкрановых конструкций напрямую влияет на устойчивость колонн промышленных зданий, а следовательно, и на металлоемкость каркаса.

Цель. Получение экономии стали при учете влияния жесткости подкрановой балки на устойчивость каркаса промышленного здания.

Материалы и методы. Для решения поставленной цели используются классические методы строительной механики. Для нахождения критических сил и коэффициентов расчетной длины при различных жесткостях элементов колонны использовался запрограммированный циклический алгоритм программного комплекса Mathcad.

Колонны промышленного здания обычно двухветвевые. Учитывая, что колонна двухветвевая, ее расчетная схема два раза статически неопределима по методу перемещений. Несущая способность колонны промышленного здания находится с помощью отыскания критической силы, которая определяется из уравнения, получаемого приравнением к нулю определителя устойчивости, состоящего из коэффициентов системы линейных уравнений метода перемещений. Помимо этого, определяется коэффициент расчетной длины для верхней и нижней частей колонны.

В статье произведено сравнение полученных результатов со схемой без учета подкрановой балки.

Результаты. Применение учета влияния жесткости подкрановой балки позволило уменьшить металлоемкость колонны на 30 %. С помощью запрограммированного циклического алгоритма в программном комплексе Mathcad были найдены критические силы и коэффициенты расчетной длины при различных жесткостях элементов колонны.

Выводы. Наиболее полный учет жесткости конструкций элементов, входящих в каркас промышленных зданий, позволяет сократить расход металла.

Ключевые слова: промышленное здание, колонна, устойчивость, каркас, жесткость, податливость, металлоемкость, податливая опора, критическая сила, определитель устойчивости

Для цитирования: Фарфель М.И., Михайлик Е.Д. Экономия стали в колонне промышленного здания при учете влияния жесткости подкрановой балки. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):71–83. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-71-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-71-83)

Вклад авторов

Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.04.2023

Поступила после рецензирования 28.04.2023

Принята к публикации 16.05.2023

STEEL SAVINGS IN AN INDUSTRIAL BUILDING COLUMN WITH ACCOUNT FOR EFFECT OF CRANE GIRDER STIFFNESS

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

E.D. MIKHAILIK^{1,2}

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

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

Abstract

Introduction. Construction science always seeks to save materials, including in the design of steel frameworks. Currently, in modern construction standards, structural analysis of frameworks for industrial buildings, namely their columns, is carried out without considering the stiffness of the crane girder which receives the load from the overhead crane. However, this factor can give a certain economy of metal, since the stiffness of crane structures directly affects the stability of columns of industrial buildings, and therefore the metal consumption of the framework.

Aim. To achieve savings of steel due to taking into account the effect of crane girder stiffness on the stability of an industrial building framework.

Materials and methods. For these purposes, the authors of the paper used classical methods of structural mechanics. A programmed cyclic algorithm of the Mathcad software was used to find the critical forces and effective length coefficients at various stiffnesses of the column elements. Columns of an industrial building are usually two-member. Given that, its structural design is twice statically indeterminate by the deflection method. The bearing capacity of an industrial building column is found by deriving the critical force, which is determined from the equation obtained by setting equal to zero the stability determinant consisting of the coefficients of the linear equation system by the deflection method. In addition, the effective length coefficient for the upper and lower parts of the column is determined. The paper compares the results obtained with the scheme without taking into account the crane girder.

Results. Considering the effect of the crane girder stiffness enabled the material consumption of the column to be reduced by 30 %. Critical forces and effective length coefficients were found at various stiffnesses of the column elements, using a programmed cyclic algorithm of the Mathcad software.

Conclusion. Taking into account the stiffness in the structures of the elements in the industrial building frameworks reduces metal consumption.

Keywords: industrial building, column, stability, framework, stiffness, yielding, metal consumption, yielding support, critical force, stability determinant

For citation: Farfel M.I., Mikhailik E.D. Steel savings in an industrial building column with account for effect of crane girder stiffness. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):71–83. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-71-83](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-71-83)

Author contribution statements

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 04.04.2023

Revised 28.04.2023

Accepted 16.05.2023

Введение

Одной из ключевых задач строительной науки является получение экономии материала при проектировании стального каркаса. В настоящей работе показано, как учет жесткости подкрановых балочных конструкций промышленного здания позволяет получить экономию материала при проектировании колонн промышленного здания.

На устойчивость колонны в горизонтальной плоскости влияет жесткость подкрановой балки, включающей в себя непосредственно саму балку и тормозную конструкцию.

Рассмотрим случай, когда подкрановая конструкция в вертикальной плоскости представляет собой шарнирно опертую на колонну разрезную балку, а в горизонтальной – неразрезную (неразрезность конструкции обеспечивает тормозной лист подкрановой конструкции).

Цель работы: получение экономии стали при учете влияния жесткости подкрановой балки на устойчивость каркаса промышленного здания.

Задачи исследования:

- построение расчетной схемы колонны промышленного здания с введением в нее «пружинной» опоры и без нее;
- определение жесткости неразрезной подкрановой балки в горизонтальной плоскости;
- определение жесткости упругоподатливой опоры, моделирующей влияние подкрановой балки на колонну;
- построение блок-схемы для определения критических сил и коэффициентов приведенной длины;
- расчет коэффициента приведенной длины для нижней и верхней частей колонны при разных отношениях критической силы, отношениях моментов инерции и отношениях площадей сечений;
- определение критических сил и коэффициентов приведенной длины без учета влияния подкрановой балки;

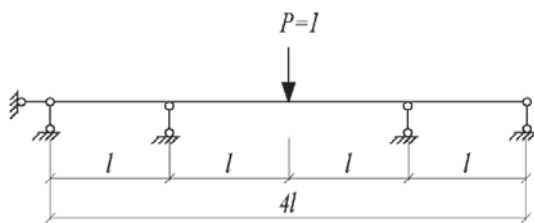


Рис. 1. Расчетная схема подкрановой балки без учета ее жесткости

Fig. 1. Crane girder structural design without considering its stiffness

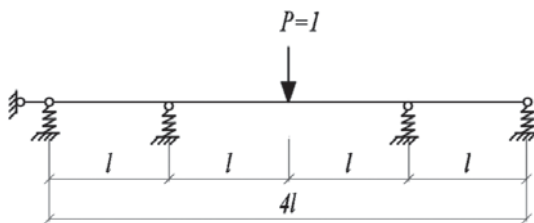


Рис. 2. Расчетная схема подкрановой балки для определения жесткости упругоподатливой опоры

Fig. 2. Crane girder structural design for determining stiffness of yielding support

– построение графиков зависимости коэффициентов приведенной длины от отношения критических сил, моментов инерции и площадей сечений;

– сравнение результатов определения критических сил и коэффициентов приведенной расчетной длины при учете воздействия подкрановой балки и без ее воздействия на колонну;

– анализ полученных результатов и определение экономии стали при проектировании колонн с учетом воздействия подкрановых конструкций на них.

Для реализации поставленной цели предварительно найдем жесткость упругоподатливой опоры, моделирующей жесткость подкрановой балки методом сил.

Расчетная схема подкрановой неразрезной четырехпролетной балки без упругоподатливой опоры и с ее учетом представлены на рис. 1 и 2 соответственно.

Определение жесткости подкрановой балки (рис. 2) сводится к нахождению податливости элементов системы.

На данную четырехпролетную подкрановую балку наложено 5 связей (4 опоры, дающие реакцию в вертикальном направлении, и одна по горизонтали). Система дважды статически неопределима, поэтому для нахождения неизвестных недостаточно одних лишь уравнений статики. Поскольку система симметрична относительно точки приложения силы. Рассматривая систему с этой позиции, разрежем балку по центральному сечению и отбросим правую часть. Возникают три силовых фактора: продольная сила реакции N , вертикальная сила реакции Q и момент R . В силу симметричности системы и симметрии приложения нагрузки кососимметричный фактор Q равняется нулю; N также равняется нулю из уравнения статики. Таким образом, если рассматривать систему, разрезав ее пополам, получается система один раз статически неопределима (рис. 3). Для раскрытия этой неопределимости используем метод сил, чтобы найти все неизвестные реакции.

Неизвестный силовой фактор R найдем из канонического уравнения метода сил [1]. Прикладываем единичный момент, где приложен момент R , строим соответствующую эпюру, находим реакции в пружинах (рис. 4):

Эпюра от заданной силы $P/2$ представлена на рис. 5.

Записываем каноническое уравнение метода сил и по правилу Верещагина определяем коэффициенты δ_{11} и δ_{1P} :

$$\delta_{1F} + R \times \delta_{11} = 0;$$

$$\delta_{11} = \frac{1}{EJ} \times \left[1 \times l \times 1 + \frac{J \times 1}{2} \times \frac{2}{3} \right] + c \left[\left(\frac{1}{l} \right)^2 + \left(\frac{1}{l} \right)^2 \right] = \frac{4}{3} \times \frac{l}{EJ} + c \times \frac{2}{l^2};$$

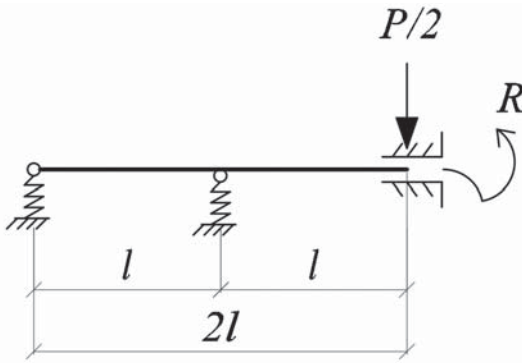


Рис. 3. К расчету подкрановой балки методом сил
Fig. 3. Calculation of crane girder by force method

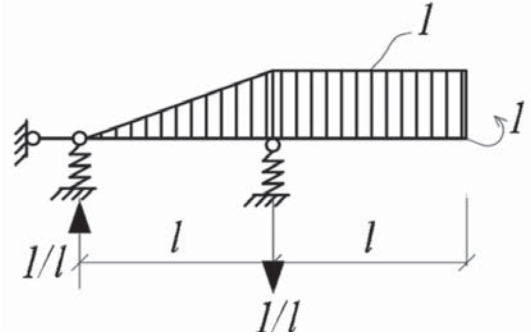


Рис. 4. Эпюра от единичного момента
Fig. 4. Unit moment diagram

$$\delta_{1P} = -\frac{1}{EJ} \times \left[\frac{1}{2} \times \frac{Pl}{2} \times l \times 1 + \frac{1}{2} \times \frac{Pl}{2} \times l \times \frac{2}{3} \right] - c \left[\frac{P}{2} \times \frac{1}{l} + P \times \frac{1}{l} \right] = -\frac{5}{12} \times \frac{Pl^2}{EJ} - c \times \frac{3}{2} \times \frac{P}{l},$$

где l – длина подкрановой балки;

EJ – жесткость балки;

c – коэффициент податливости упругой опоры.

Неизвестный силовой фактор R равняется:

$$R = -\frac{\delta_{1P}}{\delta_{11}} = \frac{\frac{5}{12} \times \frac{l^2}{EJ} + \frac{3}{2} \times c \times \frac{1}{l}}{\frac{4}{3} \times \frac{l}{EJ} + c \times \frac{2}{l^2}} \times P.$$

Перемещение в центральной точке равняется $P \times c$ (осадка упругих опор). Приложим силу в центре, то есть $\frac{1}{2} P$ к отброшенной части симметричной заданной системы. Эпюра от единичной силы $\frac{1}{2} P$ представлена на рис. 6.

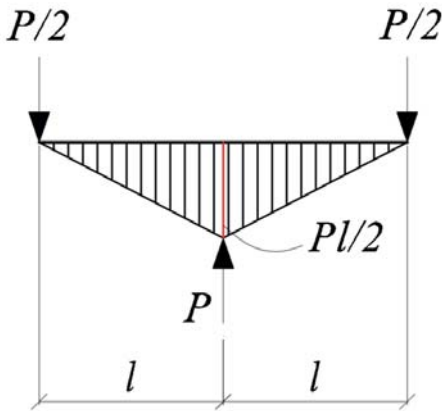


Рис. 5. Эпюра от заданной силы $P/2$
Fig. 5. Diagram due to given force $P/2$

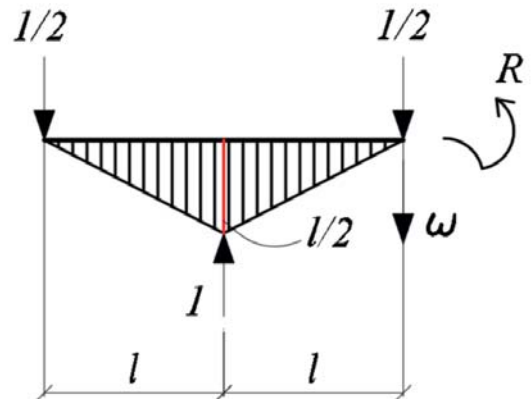


Рис. 6. Эпюра от единичной силы $P/2$
Fig. 6. Diagram due to unit force $P/2$

Далее решаем интеграл Мора графически по правилу Верещагина:

$$\omega = \delta_{22} \times P + \delta_{21} \times R$$

$$\delta_{22} = \frac{1}{EJ} \times \left[2 \times \frac{1}{2} \times l \times \frac{1}{2} \times \frac{2}{3} \times \frac{l}{2} \right] + c \times \left[\left(\frac{1}{2} \right)^2 + (1)^2 \right] = \frac{l^3}{6EJ} + \frac{5}{4}c$$

$$\delta_{21} = \frac{1}{F} \delta_{1P}$$

$$\omega = \delta_{22} \times P + \delta_{21} \times R = \frac{7 \times P \times l^6 + c \times 108 \times EJ \times P \times l^3 + 36 \times EJ^2 \times P \times c^2}{192 \times EJ \times l^3 + 288 \times EJ^2 \times c} = P \times c.$$

После преобразований получим уравнение:

$$7 \times l^6 - (252 \times EJ^2 \times c^2 + 84 \times EJ \times l^3 \times c).$$

Найдем c по формуле для корней и отбросим корень с отрицательной частью. В результате податливость C подкрановой балки равняется:

$$C = \frac{\sqrt{2}-1}{6} \times \frac{l^3}{E \times J_n},$$

Жесткость, j – обратная величина податливости:

$$j = \frac{1}{C}.$$

Решение задачи об определении критических сил методом перемещений сводится к отысканию минимального корня уравнения устойчивости, получаемого приравнением к нулю определителя. Составим расчетную схему колонны с учетом жесткости подкрановой балки промздания и построим эпюры методом перемещений [1] (рис. 7).

Запишем систему канонических уравнений метода перемещений с учетом упругоподатливой опоры, используя критические табличные параметры $\varphi_i(v)$ и $\eta_i(v)$ [1], и найдем значения коэффициентов, входящих в определитель устойчивости D .

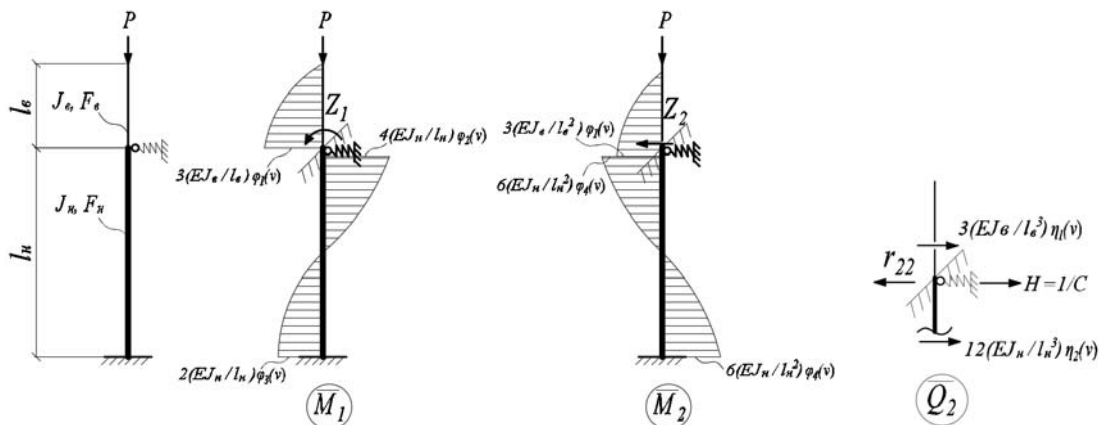


Рис. 7. Расчетная схема колонны
 Fig. 7. Column structural design

$$r_{11}Z_1 + r_{12}Z_2 + R_{1p} = 0$$

$$r_{21}Z_1 + r_{22}Z_2 + R_{2p} = 0$$

$$r_{11} = 3(EJ_B/L_B) \times \varphi_1(v) + 4(EJ_H/L_H) \times \varphi_2(v)$$

$$r_{12} = 6(EJ_H/L_H^2) \times \varphi_4(v) - 3(EJ_B/L_B^2) \times \varphi_1(v)$$

$$r_{22} = 3(EJ_B/L_B^3) \times \eta_1(v) + 12(EJ_H/L_H^3) \times \eta_2(v) + \frac{1}{C}$$

$$D = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22} \end{vmatrix} = 0$$

$$r_{11} \times r_{22} - r_{12}^2 = 0$$

Без учета жесткости подкрановой балки также составим канонические уравнения метода перемещений и определитель устойчивости D_1 с использованием критических параметров:

$$r_{11} = 3(EJ_B/L_B) \times \varphi_1(v) + 4(EJ_H/L_H) \times \varphi_2(v)$$

$$r_{12} = 6(EJ_H/L_H^2) \times \varphi_4(v) - 3(EJ_B/L_B^2) \times \varphi_1(v)$$

$$r_{22C} = 3(EJ_B/L_B^3) \times \eta_1(v) + 12(EJ_H/L_H^3) \times \eta_2(v)$$

$$D_1 = \begin{vmatrix} r_{11} & r_{12} \\ r_{21} & r_{22C} \end{vmatrix} = 0$$

$$r_{11} \times r_{22C} - r_{12}^2 = 0$$

После решения определителей устойчивости D и D_1 и нахождения критических сил по критическому параметру был использован запрограммированный циклический алгоритм в программном комплексе Mathcad.

Для решения сложного нелинейного уравнения устойчивости при раскрытии определителя D в программном комплексе Mathcad находились корни с помощью метода деления отрезка пополам (метод бисекции) – один из простейших методов нахождения корней нелинейных уравнений. Блок-схема итерационного метода представлена на рис. 8.

Для реализации дальнейших расчетов была составлена блок-схема, используемая в качестве алгоритма в программном комплексе Mathcad (рис. 9).

В результате были получены графики зависимостей коэффициентов приведенной длины от отношения критических сил, моментов инерции и площадей сечения (рис. 10–12).

Проведя анализ результатов по приведенным графикам и выполнив сравнение с традиционным методом расчета, при котором не учитывается жесткость подкрановой балки, было получено: увеличение критической силы F на 20 %, уменьшение момента инерции на 20 % и уменьшение площади сечения на 30 %.

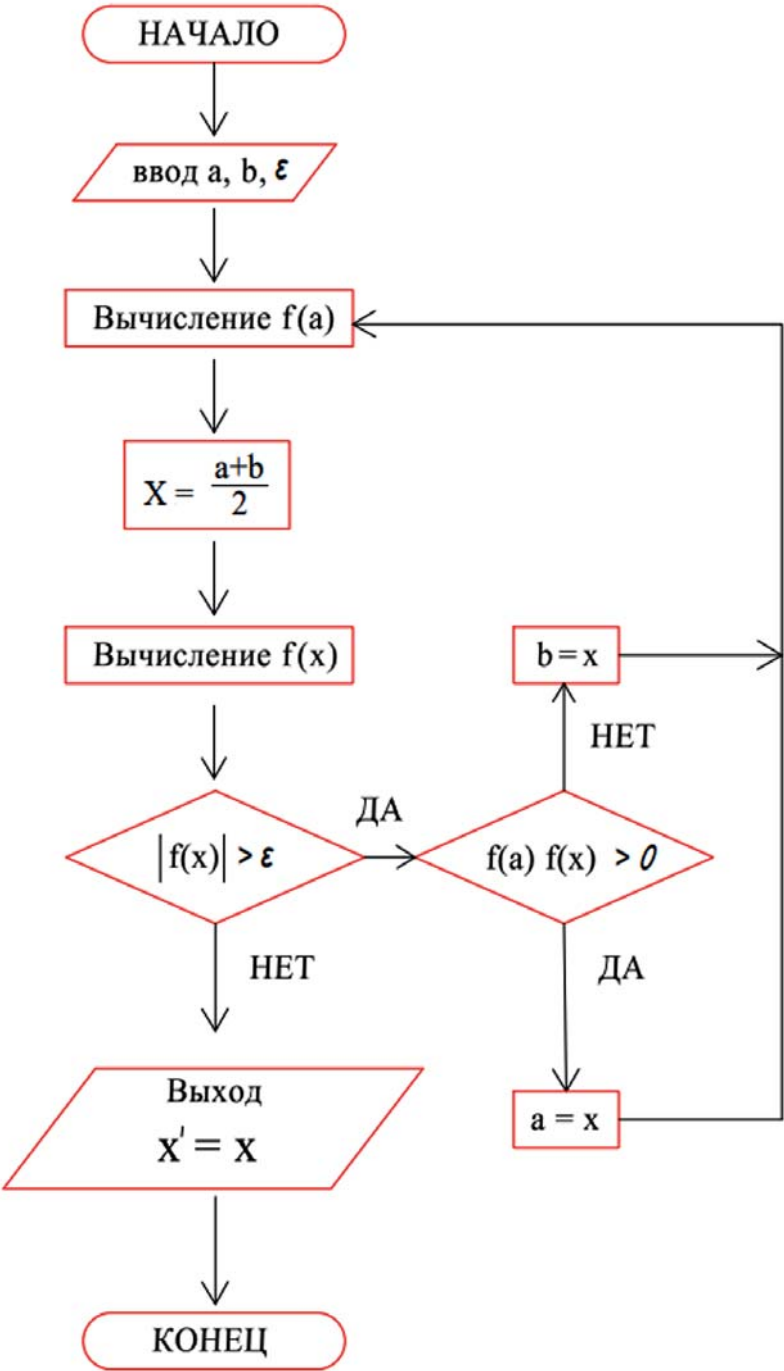


Рис. 8. Блок-схема итерационного метода

a и *b* – концы интервала – величины *v*; *f(x)* – правая часть уравнения;
ε – точность вычислений; *x'* – корень решения нелинейного уравнения

Fig. 8. Schematic diagram of iteration method

a and *b* – the values of the interval extremities *v*; *f(x)* – the right part of the equation;
ε – calculation accuracy; *x'* – the root of the nonlinear equation solution



Рис. 9. Блок-схема
Fig. 9. Schematic diagram

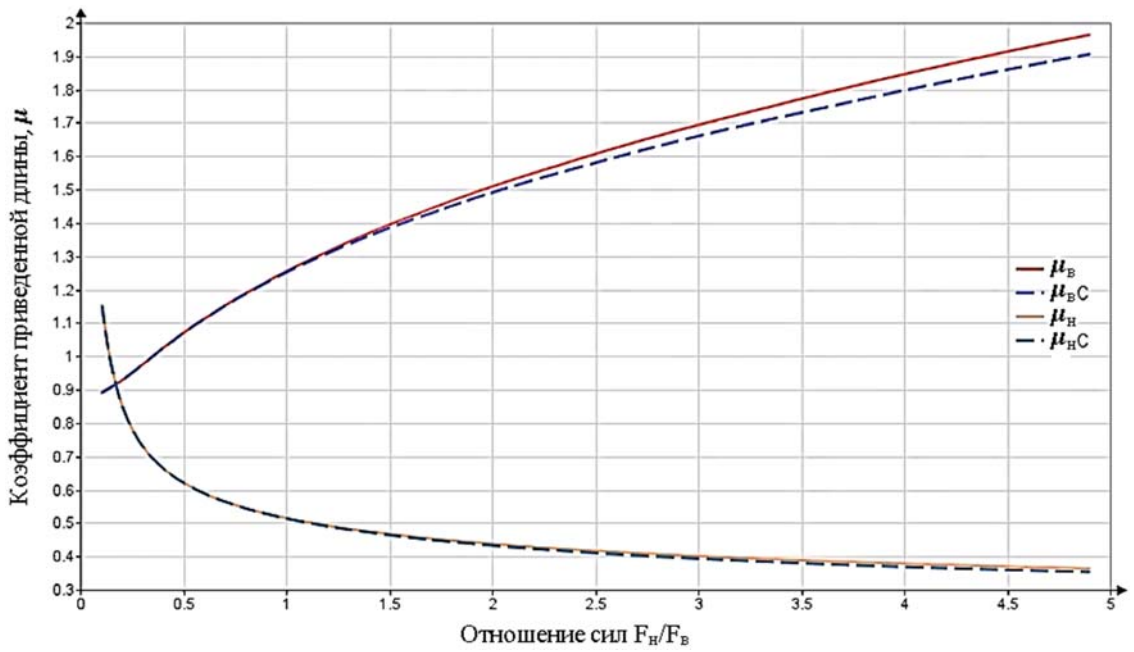


Рис. 10. Зависимость коэффициентов приведенной длины от отношения критических сил
Fig. 10. Dependence of effective length coefficients on critical forces ratio

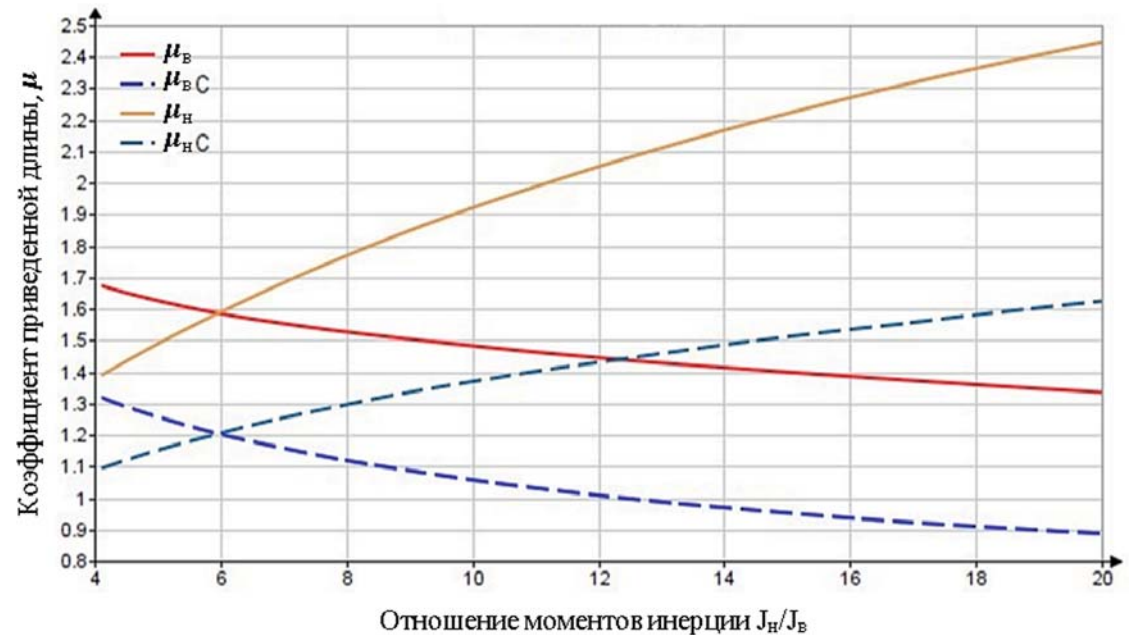


Рис. 11. Зависимость коэффициентов приведенной длины от отношения моментов инерции
Fig. 11. Dependence of effective length coefficients on inertia ratio

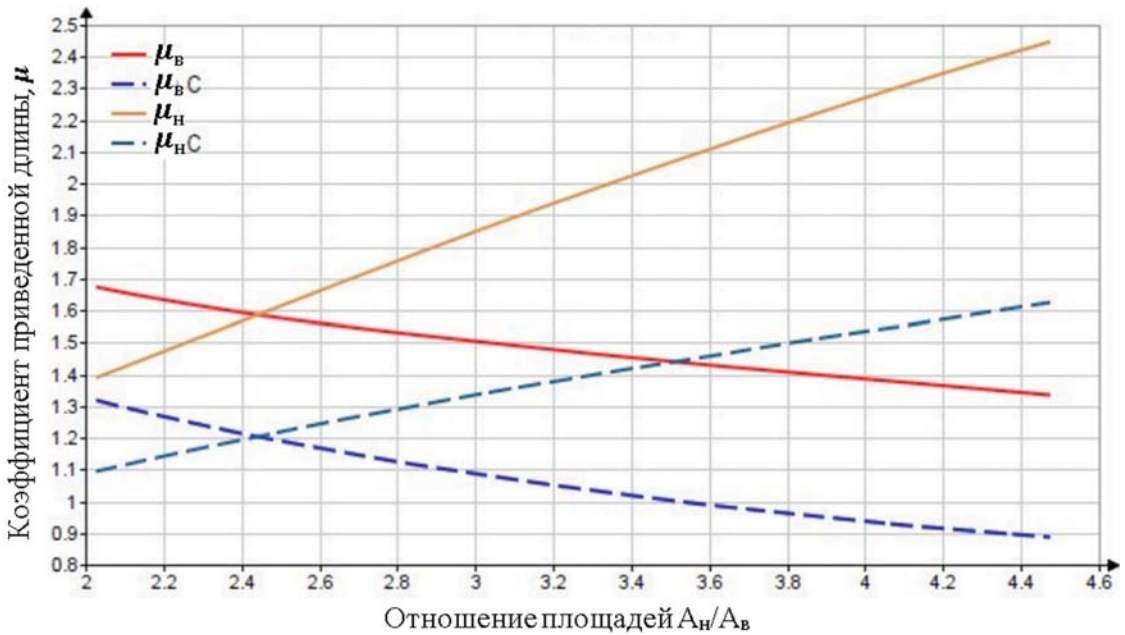


Рис. 12. Зависимость коэффициентов приведенной длины от отношения площадей сечений

Fig. 12. Dependence of effective length coefficients on cross-sectional area ratio

Выводы

1. Критическая сила (см. рис. 10) при введении упругоподатливой опоры становится больше на 20 %.
2. При учете работы подкрановой балки в каркасе здания момент инерции уменьшился на 20 % (см. рис. 11), так как коэффициент приведенной длины прямо пропорционален площади и обратно пропорционален критической силе.
3. Площадь сечения при прочих фиксированных величинах уменьшается на 30 % (см. рис. 12).

Список литературы

1. Дарков А.В., Клейн, Г.К., Кузнецов, В.И., Лужин О.В., Рекач В.Г., Синельников В.В., Шпиро Г.С. (под ред. Даркова А.В.). Строительная механика. Москва: Высшая школа; 1976.
2. Клейн Г.К., Рекач В.Г., Розенблат Г.И. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики. Издание второе переработанное и дополненное. Москва: Высшая школа; 1972.
3. Кудишин Ю.И., Беленя Е.И., Игнатьева В.С. (ред.), [и др.]. Металлические конструкции. Изд. 12-е. Москва: Академия; 2010.
4. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* [с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4 и № 5]. Москва: Минстрой России; 2017.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4]. Москва: Стандартинформ; 2018.
6. СП 294.1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования [с Изменениями № 1, № 2 и № 3]. Москва: Минстрой России; 2017.

7. Безухов Н.И., Лужин О.В., Колкунов Н.В. Устойчивость и динамика сооружений (в примерах и задачах). Изд. 3-е. Москва: Высшая школа; 1987.
8. Вольмир А.С. Устойчивость деформируемых систем. Изд. 2-е. Москва: Наука; 1967.
9. Дьяконов В.П. Справочник по MathCAD PLUS 7.0 PRO. Универсальная система математических расчетов. Москва: СК Пресс; 1998.
10. Киселев В.А. Строительная механика. Специальный курс. Динамика и устойчивость сооружений. Москва: Стройиздат; 1980.

References

1. Darkov A.V., Klein, G.K., Kuznetsov, V.I., Luzhin O.V., Rekach V.G., Sinelnikov V.V., Shpiro G.S. Construction mechanics. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1976. (In Russian).
2. Klein G.K., Rekach V.G., Rosenblat G.I. Guide to practical classes in the course of structural mechanics. The second edition has been revised and supplemented. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1972. (In Russian).
3. Kudishin Yu.I., Belenya E.I., Ignat'eva V.S. Metal structures. 12th Ed. Moscow: Akademiya Publ.; 2010. (In Russian).
4. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81* (with Amendments No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4 and No. 5). Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2017. (In Russian).
5. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85* (with Amendments No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4). Moscow: Standartinform; 2018. (In Russian).
6. SP 294.1325800.2017. The construction of steel. Design rules (with Amendments No. 1, No. 2 and No. 3). Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2017. (In Russian).
7. Bezukhov N.I., Luzhin O.V., Kolkunov N.V. Stability and dynamics of structures (in examples and tasks). 3rd Ed. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1987. (In Russian).
8. Volmir A.S. Stability of deformable systems. 2nd Ed. Moscow: Nauka Publ.; 1967. (In Russian).
9. Dyakonov V.P. Handbook of MathCAD PLUS 7.0 PRO. Universal system of mathematical calculations. Moscow: SK Press; 1998. (In Russian).
10. Kiselev V.A. Construction mechanics. A special course. Dynamics and stability of structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1980. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

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

Екатерина Дмитриевна Михайлик, инженер лаборатории нормирования, реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», магистр кафедры металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ, Москва
e-mail: mihailik1999@list.ru
тел.: +7 (923) 128-24-28

Ekaterina D. Mikhailik, Engineer, Laboratory for Reconstruction, Standardization, and Monitoring of Unique Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Master (Engineering), Department of Metal and Wooden Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: mikhailik1999@list.ru
tel.: +7 (923) 128-24-28

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.138

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-84-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-84-97)

EDN: HUOPLS

НОВАЯ МЕТОДИКА ИСПЫТАНИЙ КРУПНООБЛОМОЧНЫХ ГРУНТОВ «ЖИДКИМ ШТАМПОМ»

А.В. РОСТОВЦЕВ, канд. техн. наук

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 настоящее время метод испытаний плоским штампом в скважине является наиболее эффективным для определения деформационных характеристик крупнообломочных грунтов. При этом основной проблемой таких испытаний является низкая достоверность результатов вследствие невозможности качественной зачистки забоя скважины.

Целью работы является разработка новой методики штамповых испытаний с использованием промежуточного слоя из жидкого быстротвердеющего материала, обеспечивающего равномерную передачу нагрузки на крупнообломочный грунт.

Материалы и методы. Проведенный автором комплекс лабораторных и полевых исследований по подбору материала контактного слоя, удовлетворяющего требованиям по пластичности, температуре и времени твердения, а также достигнутой прочности, позволил рекомендовать к применению жидкий быстротвердеющий композитный материал MasterFlow 928. Была разработана технология его доставки к забою скважины, получены данные по минимально необходимой толщине контактного слоя в зависимости от размера частиц испытываемых грунтов. Методика применения быстротвердеющих композитных материалов была апробирована на трех опытных площадках в различных грунтовых условиях и двух отсыпанных экспериментальных участках, на которых выполнен комплекс параллельных испытаний плоским штампом площадью 600 см² с применением быстротвердеющих композитных материалов и без них. Максимальное расхождение полученных значений модуля деформации для штампов с применением быстротвердеющих композитных материалов от «эталонных» (винтовой штамп при испытаниях в скважине на опытных площадках и плоский штамп площадью 5000 см² при испытаниях с поверхности на опытных участках) не превысило 14 %.

Результаты. На основе выполненных экспериментальных исследований были разработаны методика и «Рекомендации по проведению штамповых испытаний с использованием быстротвердеющих материалов на контакте штампа с грунтом».

Выводы. Предложенная новая методика штамповых испытаний позволяет решить проблему определения модуля деформации крупнообломочных грунтов за счет использования промежуточного слоя из жидкого быстротвердеющего материала, улучшающего контакт штампа с грунтом для равномерной передачи нагрузки, что значительно увеличивает достоверность определения деформационных характеристик.

Ключевые слова: крупнообломочные грунты, штамповые испытания, жидкий штамп, быстротвердеющий материал на контакте штампа с грунтом

Для цитирования: Ростовцев А.В. Новая методика испытаний крупнообломочных грунтов «жидким штампом». Вестник НИЦ «Строительство». 2023;37(2):84–97. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-84-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-84-97)

Вклад автора

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

Финансирование

Исследование выполнено в рамках НИИОКР «Определение деформационных характеристик крупнообломочных грунтов с использованием быстротвердеющих материалов на контакте штампа с грунтом», УДК 624.138, № НИОКТР 121062700017-9, Рег. № ИКРБС.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 06.04.2023

Поступила после рецензирования 27.04.2023

Принята к публикации 02.05.2023

NEW METHODOLOGY FOR TESTING VERY COARSE SOILS BY “LIQUID PLATE LOADING”

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

Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy av., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. At present, the plate load testing is considered to be the most effective method for determining the deformation parameters of very coarse soils. However, the major challenge associated with such tests is the low accuracy of the results due to the inability to properly clean the borehole bottom.

Aim. To develop a new methodology for plate load testing using an intermediate layer of a liquid, quick-setting material to ensure uniform load transfer to the very coarse soil.

Materials and methods. The author conducted a number of laboratory and site investigations in order to select contact layer material, which meets requirements for plasticity, temperature, strengthening and setting time. Following that, the author recommended a liquid quick-setting composite material MasterFlow 928 for application. The study involved development of a technology for the material delivery to the borehole bottom and gathering data on the minimum required thickness of a contact layer depending on particle size of the tested soils. The methodology of using quick-setting composite materials was tested at three sites in different soil conditions and at two experimental plots where a set of parallel tests was made using 600 cm² plate with and without quick-setting composite materials. The maximum discrepancy between the values of the deformation modulus obtained for the plates with application of quick-setting composite materials and the “reference” ones (screw and flat plate of 5000 cm²) did not exceed 14 %.

Results. On the basis of the experimental investigations, the author developed a methodology and “Recommendations for plate loading tests to carry out using quick-setting materials at the plate-soil contact”.

Conclusion. The suggested methodology for plate load testing tackles the issue of determining the deformation modulus for very coarse soils by using an intermediate layer of quick-setting liquid material that improves the contact between the plate and the soil for uniform load transfer, thus greatly increasing the accuracy of deformation parameters.

Keywords: very coarse soils, plate loading tests, liquid plate, quick-setting material at the plate-soil contact

For citation: Rostovtsev A.V. New methodology for testing very coarse soils by “liquid plate loading”. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):84–97. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-84-97](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-84-97)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

The study was carried out as part of R&D project "Determination of Deformation Parameters of Very Coarse Soils Using Fast-Setting Materials in Contact with Soil", UDC 624.138, No. R&D 121062700017-9, Reg. No. ICRBS.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 06.04.2023

Revised 27.04.2023

Accepted 02.05.2023

Крупнообломочные грунты имеют широкое распространение на территории Российской Федерации в пределах горноскладчатых районов и щитов древних платформ, где слагают мощные (до нескольких десятков метров) толщи гравитационных, пролювиальных, элювиальных, аллювиальных и водно-ледниковых отложений [1].

Достаточно часто в практике строительства эти отложения являются естественным или насыпным основанием зданий и сооружений, линейных объектов (автомобильные и железные дороги), гидротехнических сооружений и др. [2]. В настоящее время наиболее достоверным из существующих методов определения деформационных характеристик крупнообломочных грунтов являются штамповые испытания [3–6].

В практике изысканий при глубине залегания исследуемых грунтов свыше 3,0–5,0 м или близком расположении от поверхности грунтовых вод применяются испытания в скважине штампом площадью 600 см² в соответствии с ГОСТ 20276.1-2020 «Грунты. Метод испытания штампом» [7]. При этом используется два типа конструкций с плоским (тип III) и винтовым штампом (тип IV).

Для испытаний в крупнообломочных грунтах неприменима конструкция винтового штампа (тип IV). Это связано с тем, что практически невозможно завернуть штамп в массив таких грунтов без разрушения их структуры.

Основной проблемой испытаний плоским штампом типа III является невозможность качественной подготовки забоя для проведения статических испытаний с необходимой точностью выравнивания поверхности до 1–2 мм. Весьма перспективным для решения этой проблемы является использование промежуточного слоя, позволяющего обеспечить надежный контакт штампа с грунтом.

Принципиальная схема таких испытаний приведена на рис. 1.

В качестве контактного слоя может быть использован быстротвердеющий композитный материал (далее – БКМ), который должен обладать высокой пластичностью для заполнения неровностей поверхности забоя скважины; необходимым временем схватывания, в течение которого его можно доставить на дно скважины и провести монтаж штампа; высокой прочностью за небольшое время твердения. Из опыта проведения полевых штамповых испытаний это время должно быть 12–24 часа [8, 9].

Кроме того, материал должен обладать незначительной сжимаемостью для обеспечения полной передачи нагрузки от штампа на грунт. Модуль деформации материала в диапазоне давлений до 1,0 МПа должен быть не ниже 200 МПа. Весьма важным является возможность его применения при температурах, характерных для глубин проведения

штамповых испытаний. По данным проведенного анализа, температурный режим в грунтах основания на отметках испытаний от 5,0 до 30,0 м характеризуется стабильной температурой в диапазоне 8–10 °С.

Для разработки методики проведения штамповых испытаний с применением быстротвердеющих композитных материалов БКМ на контакте штампа с грунтом были проведены лабораторные и полевые экспериментальные исследования.

Лабораторные исследования включали выбор материала БКМ на основе исследований его пластичности, времени и температуры твердения, оценку деформационных свойств выбранного материала, изучение сил трения по боковой поверхности обсадных труб.

Полевые исследования включали разработку технологии доставки БКМ на забой скважины и параллельные штамповые испытания в различных грунтовых условиях с использованием БКМ и «эталонные», в качестве которых были взяты штампы площадью 5000 см² при испытаниях с поверхности и винтовой штамп площадью 600 см² при испытаниях в скважине.

Выбор материала для контактного слоя был сделан на основе анализа свойств полиэфирных смол, полимербетонов и безусадочных быстротвердеющих бетонных смесей. Полиэфирные смолы не подошли из-за высокой стоимости, полимербетоны – по требованиям высокой температуры для твердения. В наибольшей степени условиям, приведенным выше, соответствуют быстротвердеющие композитные материалы – бетонные смеси, применяемые в строительстве для ремонта ответственных конструкций: АРБ-10 (10 Ф), MasterFlow 928 и зимний состав наливного типа Иннолайн NC40 RF2.

На первом этапе в лабораторных условиях были проведены исследования пластичности, времени и температуры твердения этих материалов.

Исследования пластичности (способности заполнять поровое пространство между обломками) выполнены на моделях грунтов с размером обломков от 30 до 170 мм разной степени окатанности с песчаным и глинистым заполнителем [10]. Выполненные опыты показали, что с увеличением размера обломков увеличивается площадь контакта материалов с частицами грунта. Вместе с тем имеются существенные различия у материалов по способности заполнять поровое пространство. Для MasterFlow 928 зафиксировано от 79 до 91 % заполнения порового объема, для остальных – от 48 до 71 % (рис. 2).

С целью проверки способности создавать надежный контакт с обломками грунта были проведены исследования в лотке размером 600 × 600 × 500 мм на разрезанной пополам

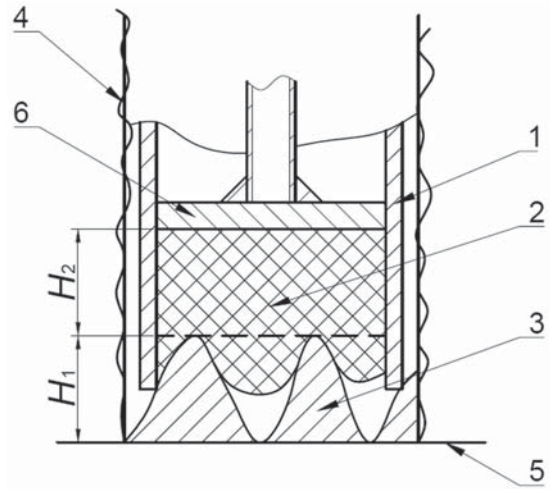


Рис. 1. Схема контакта штампа с обломками грунта на забое скважины: 1 – обсадная труба; 2 – контактный слой; 3 – обломки грунта; 4 – скважина; 5 – поверхность забоя скважины; 6 – штамп; H_1 – высота обломков над плоскостью забоя скважины; H_2 – высота контактного слоя над обломками

Fig. 1. Diagram of plate-soil contact at borehole bottom: 1 – well casing; 2 – contact layer; 3 – soil fragments; 4 – well; 5 – surface of borehole bottom; 6 – plate; H_1 – altitude of fragments above the plane of borehole bottom; H_2 – altitude of the contact layer above the fragments

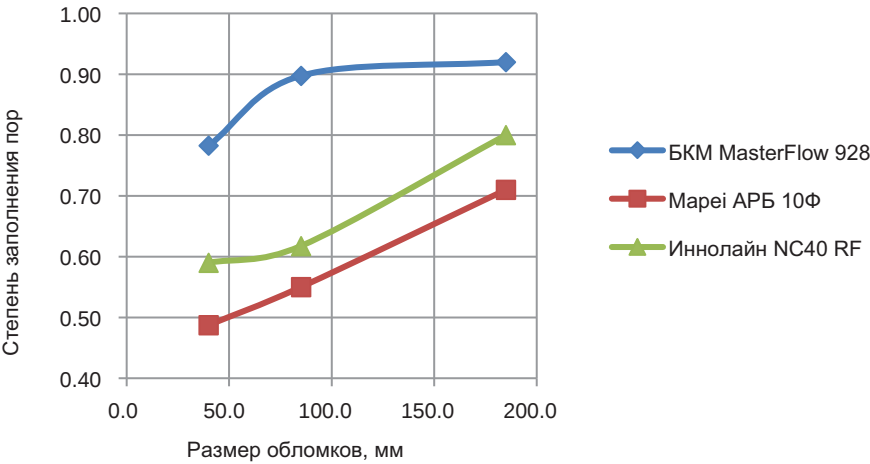


Рис. 2. Зависимость степени заполнения пор от размера обломков
Fig. 2. Dependence of pore filling degree on fragments size

модели штампа в обсадной трубе, помещенной вплотную к прозрачной стенке (рис. 3). Исследования контакта выполнены с моделями грунтов с размером обломков 20–50 мм; 50–100 мм; 100–150 мм с использованием быстротвердеющего композитного материала БKM MasterFlow 928.

Как видно из приведенной фотографии (рис. 3), при использовании БKM достигается практически полный контакт штампа с грунтом.

Для всех рассматриваемых материалов: Mapei APB-10 (APB-10Ф), MasterFlow 928, Иннолайн NC40 RF2 – были выполнены исследования влияния времени твердения на значения модуля деформации. Исследования выполнены на цилиндрических образцах диаметром 75 мм и высотой 70 мм. Анализ графиков зависимости значений модуля деформации от времени твердения (рис. 4) показал, что по скорости набора прочности



Рис. 3. Контакт БKM с грунтом с размером обломков 50–100 мм
Fig. 3. Contact of BCM (bimetallic composite material) with soil of 50–100 mm sized fragments

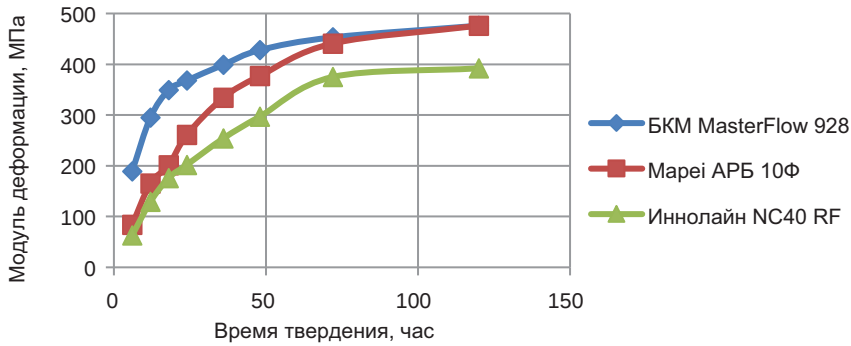


Рис. 4. Зависимость модуля деформации от времени твердения (для образцов диаметром 75 мм и высотой 70 мм)
Fig. 4. Dependence of deformation modulus on setting time (for samples of 75 mm in diameter and 70 mm in height)

MasterFlow 928 значительно превосходит остальные материалы и может применяться уже через 12 часов после укладки на забой скважины.

На основании выполненных определений пластичности и скорости набора прочности для дальнейших исследований выбран материал фирмы BASF MasterFlow 928, который производится в различных регионах РФ.

Одной из важнейших характеристик для оценки способности БКМ по созданию контактного слоя грунтов со штампом является собственная сжимаемость материала. При очень высокой сжимаемости, соизмеримой с деформационными свойствами исследуемых грунтов, возникнет неопределенность в разделении осадки от приложенной к штампу нагрузки на осадку грунта и осадку за счет сжатия материала БКМ. По данным таких испытаний будет практически невозможно провести достоверное определение модуля деформации.

Для оценки собственной сжимаемости БКМ в лабораторных условиях был выполнен комплекс испытаний как цилиндрических образцов диаметром 75 мм и высотой 70 мм, так и образцов натурального размера диаметром 290–300 мм и высотой от 50 до 150 мм.

На образцах натурального размера, твердение которых осуществлялось при температуре 8–10 °С, соответствующей температурному режиму на глубине проведения штамповых испытаний, выполнены исследования сжимаемости образцов высотой 50, 100 и 150 мм при времени твердения 1–3 суток.

Диапазон 50–150 мм по толщине слоя БКМ был принят из условия возможности проведения штамповых испытаний крупнообломочных грунтов с размером обломков до 200 мм. Для валунных (глыбовых) крупнообломочных грунтов с размером частиц свыше 200 мм метод проведения штамповых испытаний в скважине площадью 600 см² (диаметр 27,64 см) не применим вследствие того, что при таком размере обломков будет невозможно обеспечить равномерное нагружение основания. Были проведены две серии опытов: однородного материала БКМ и с обломками грунтов в нижней части (30 % по толщине образца). Полученная зависимость значения модуля деформации от толщины образца приведена на рис. 5.

Методика штамповых испытаний с применением БКМ предполагает заливку порции смеси в обсадную трубу и последующего приложения вертикальной нагрузки через штамп. При этом происходит перемещение слоя с соответствующей реализацией сил трения по боковой поверхности обсадных труб. В процессе лабораторных испытаний были выполнены измерения сил трения при применении обсадных труб из различных материалов: стальных

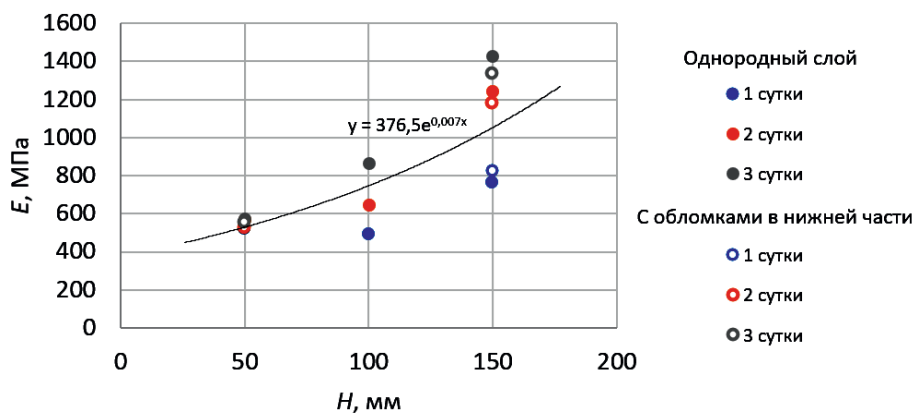


Рис. 5. Зависимость модуля деформации от толщины слоя БКМ
Fig. 5. Dependence of deformation modulus on thickness of BCM layer

по ГОСТ 32696-2014 [11] и пластиковых ПНД по ГОСТ 18599-2001 [12]. Измерения показали, что нельзя использовать стальные трубы без применения специальных полимерных вкладышей для снижения трения. Это связано с высокой адгезией БКМ к стали. При применении пластиковых обсадных труб наличие или отсутствие полимерного вкладыша не влияло на получаемые результаты.

На основе проведенных исследований был выполнен расчет дополнительных нагрузок, которые необходимо приложить при проведении испытаний для преодоления сил трения. Дополнительные нагрузки должны быть включены в первую ступень при проведении испытаний. Результаты расчета для обсадных труб внутренним диаметром 300 мм представлены в табл. 1.

На рис. 6 приведены полученные значения модуля деформации при испытаниях образцов толщиной 100 и 150 мм при времени твердения от 12 до 72 часов. Выбор этого временного интервала обусловлен технологией проведения штамповых испытаний. Как правило, испытание проводится на следующий день после бурение скважины и монтажа оборудования (через 12–24 часа). В том случае, если работы проводились в пятницу, то испытание начинается в понедельник, т. е. через 3 суток.

Как видно из приведенных данных, с увеличением времени твердения уменьшается сжимаемость БКМ. Зависимость может быть представлена в виде линейного уравнения (1):

$$E = 13,6 \times t + 291, \tag{1}$$

Таблица 1

Нагрузка для преодоления сил трения

Table 1

Нагрузка для преодоления сил трения, кН					
Крупнообломочные грунты при размере обломков, мм				Глинистые грунты с содержанием 25–40 % обломков свыше 10 мм при размере облом., мм	
10–50	50–100	100–150	150–200	50–100	100–200
1,5	2,0	2,0	3,0	2,0	2,5

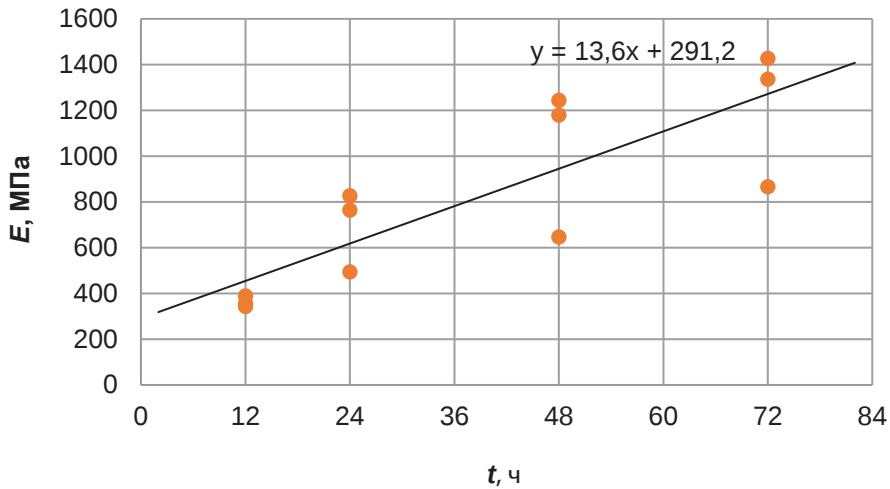


Рис. 6. Зависимость модуля деформации E , МПа, от времени твердения t , час, при толщине слоя БКМ 100–150 мм
Fig. 6. Dependence of deformation modulus E , МПа, on the setting time t , hour, with 100–150 mm BCM layer thickness

где E – модуль деформации, МПа;
 t – время твердения, час.

Полученные экспериментальные зависимости модуля деформации от толщины слоя и времени твердения БКМ были применены при разработке методики расчета модуля деформации по результатам штамповых испытаний, которая учитывает собственное сжатие контактного слоя.

Важной задачей была разработка технологии доставки БКМ на забой скважины для практической реализации предлагаемого метода при проведении изысканий. В настоящее время предложено два технологически простых способа доставки БКМ на забой скважины.

Первый способ заключается в использовании бурового инструмента – желонки или бурового стакана, на конце которых с помощью хомута устраивается временное дно из полимерной пленки толщиной 30–40 мк. Приготовленная порция БКМ заливалась внутрь желонки или стакана. При опускании инструмента в скважину производился его сброс с высоты 0,5–0,7 м от забоя и резкая остановка. Это приводит к разрушению временного дна, разрыву пленки и заливке БКМ на забой.

Второй способ заключается в доставке приготовленной порции БКМ в полимерном контейнере, который с помощью хомута закреплен на буровых трубах, через которые передается давление на штамп. Рекомендуемые размеры цилиндрического контейнера составили: диаметр основания – 400 мм, высота – 1000 мм, толщина полиэтилена – 40–60 мк в зависимости от веса доставляемой к забою порции смеси.

С целью оценки области применения штамповых испытаний с использованием быстротвердеющих композитных материалов были выполнены параллельные штамповые испытания штампами различных конструкций с применением БКМ и без него в наиболее характерных грунтовых условиях.

Полевые испытания проведены на трех опытных площадках и двух искусственно сформированных участках. На площадке № 1 были исследованы окатанные крупнообломочные

грунты – галечниковые отложения с песчаным заполнителем; на площадке № 2 – неокатанные щебенистые отложения с глинистым заполнителем, на площадке № 3 – элювиальные щебенистые отложения, образовавшиеся при выветривании коренных известняковых пород. Опытный участок № 1 сформирован из тугопластичных суглинков с включением известкового щебня до 35–40 %, опытный участок № 2 – из известкового щебня с заполнителем из известковой муки.

На опытных площадках № 1–3 были выполнены параллельные испытания крупнообломочных грунтов штампами различных конструкций: плоским штампом типа III площадью 600 см² без БКМ и 700 см² с применением БКМ, а также винтовым штампом площадью 600 см² типа IV по ГОСТ 20276.1-2020 [7] (на площадках № 1 и 2).

На опытных участках были проведены штамповые испытания грунтов плоским штампом площадью 5000 см² (тип I), плоским штампом типа III площадью 600 см² без БКМ и 700 см² с применением БКМ.

Результаты параллельных штамповых испытаний приведены на рис. 7 и 8.

Как видно из представленных на рис. 7 и 8 данных, испытания плоским штампом без БКМ в большинстве случаев не позволяют выполнить расчет модуля деформации. На полученных графиках «осадка – нагрузка» прослеживается чередование участков плавного роста осадки с ее провалами. Это связано с непостоянством контакта штампа с обломками грунта, выступающими над плоскостью забоя скважины. В процессе нагружения происходит пространственная переориентация обломков с изменением площади контакта, что влияет на характер зависимости осадки штампа от приложенного давления.

По данным полевых штамповых испытаний, на опытных площадках получены следующие значения модуля деформации, которые изменяются для галечников с песчаным заполнителем от 46 до 59 МПа, для щебня с глинистым заполнителем от 35 до 46 МПа, для щебня элювиальных отложений с заполнителем из известковой муки от 73 до 79 МПа. Для искусственно сформированных крупнообломочных грунтов на опытных участках получены следующие результаты: на участке № 1, сложенном полутвердыми суглинками с включениями щебня до 35–40 %, модуль деформации варьирует в интервале 38–45 МПа; на участке № 2, сложенном щебнем, модуль деформации изменяется от 55 до 65 МПа.

Сопоставление данных параллельных испытаний показывает хорошую сходимость штампов с БКМ с результатами «эталонных» испытаний штампов площадью 5000 см² при испытаниях с поверхности и винтовым штампом площадью 600 см² при испытаниях в скважине. Максимальное расхождение полученных значений не превысило 14 %.

На основе выполненных исследований была предложена методика испытаний плоским штампом типа III с применением быстротвердеющих композитных материалов БКМ на контакте штампа с грунтом. Метод рекомендуется применять для всех видов крупнообломочных грунтов с размером частиц до 200 мм и в глинистых и песчаных грунтах, содержащих 25–40 % крупнообломочных включений. Критерием целесообразности выбора предлагаемого метода для конкретных грунтовых условий может служить невозможность применения винтового штампа типа IV без нарушения структуры грунтов.

Новая методика учитывает время набора прочности БКМ при твердении материала, а также величину усилия на преодоление сил трения по боковой поверхности обсадных труб, которое следует включать в первую ступень нагружения при проведении статических испытаний (табл. 2).

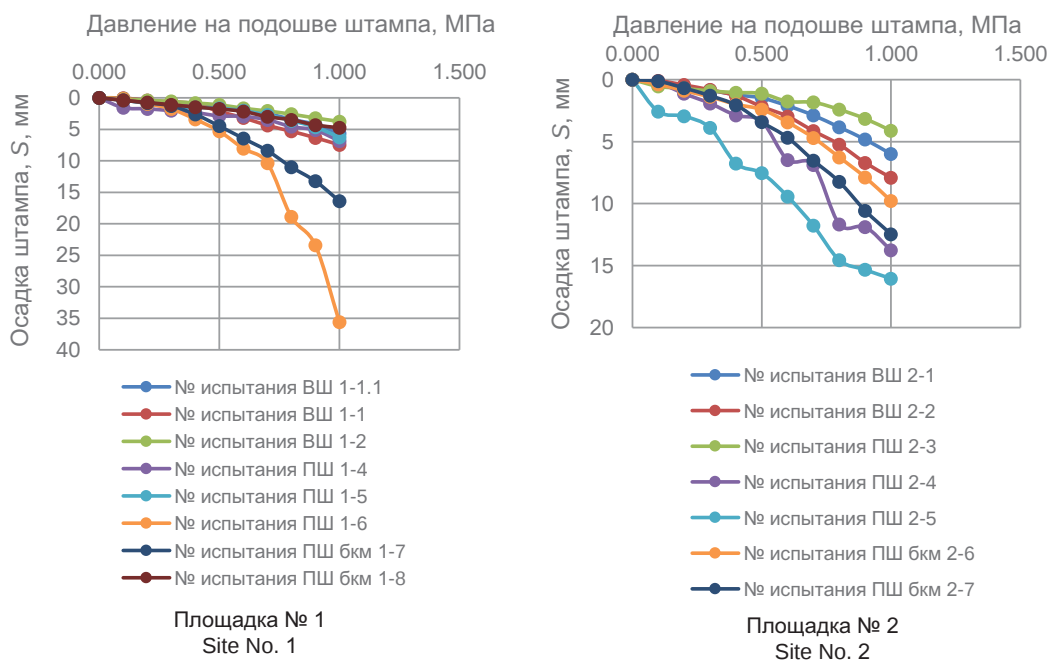


Рис. 7. Результаты штамповых испытаний галечников с песчаным заполнителем (площадка № 1), щебня известняка с глинистым заполнителем (площадка № 2)

Fig. 7. Results of plate loading tests of pebbles with sandy aggregate (site No. 1), limestone crushed stone with clay aggregate (site No. 2)

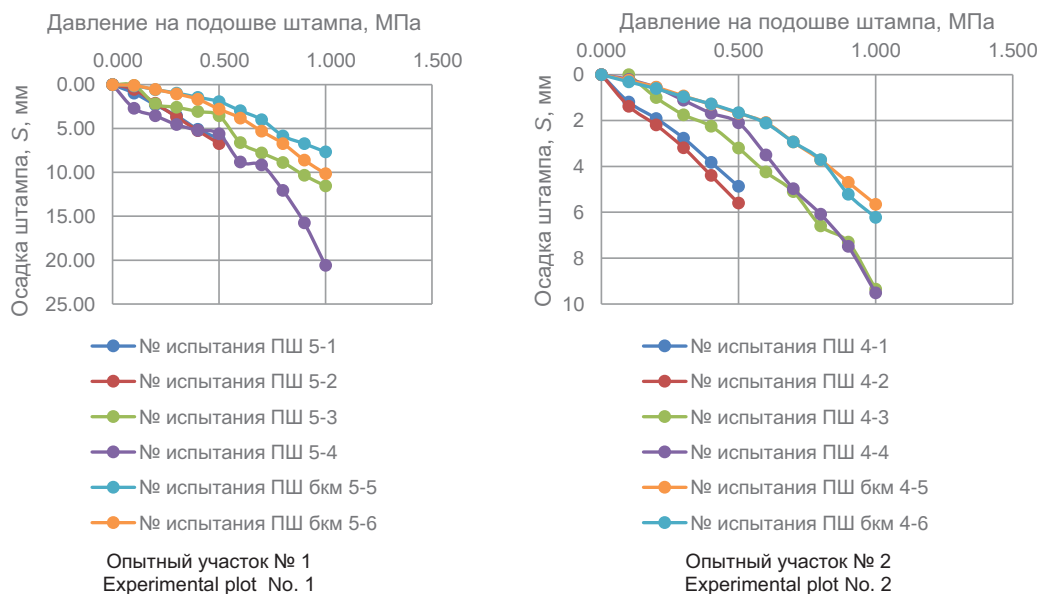


Рис. 8. Результаты штамповых испытаний в суглинках тугопластичных с включением до 35–40 % обломков 70–150 мм (участок № 1), в известковом щебне с заполнителем из известковой муки (участок № 2)

Fig. 8. Results of plate loading tests in low-plastic loams with up to 35–40 % inclusions of 70–150 mm fragments (site No. 1), in limestone crushed stone with aggregate of lime powder (site No. 2)

По полученному при штамповых испытаниях графику зависимости «осадка – нагрузка» (рис. 9) расчет модуля деформации проводится по формуле (2) с учетом собственного сжатия слоя быстротвердеющего композитного материала БКМ:

$$E = (1 - \nu^2) \times K_{\text{БКМ}} \times K_y \times D \times \Delta p / \Delta S, \tag{2}$$

где ν – коэффициент поперечного расширения (Пуассона), принимаемый равным 0,27 для крупнообломочных грунтов; 0,30 – для песков и супесей; 0,35 – для суглинков; 0,42 – для глин;
 K_y – коэффициент, принимаемый для жесткого круглого штампа равным 0,79;
 $K_{\text{БКМ}}$ – коэффициент, учитывающий собственную сжимаемость БКМ, принимаемый при E свыше 30 МПа по табл. 2, при E менее 30 МПа равным 1,0;
 D – диаметр штампа, см;
 Δp – приращение давления на штамп равно $p_n - p_0$, МПа;
 p_0 – давление от собственного веса грунта на глубине штампового испытания;
 p_n – давление в конце линейного участка (3–4-я точка после p_0);
 Δs – приращение осадки штампа.

Таблица 2

Значения коэффициента $K_{\text{БКМ}}$

Table 2

Coefficient values K_{bcm}

Время твердения, час	12	24	48	свыше 48
$K_{\text{БКМ}}$	1,2	1,15	1,1	1,0

Примечание: Коэффициенты даны для БКМ MasterFlow 928. При применении других быстротвердеющих материалов необходимо провести измерения их сжимаемости для корректировки значений коэффициента $K_{\text{БКМ}}$
Note: Coefficients are given for BCM MasterFlow 928. If other quick-setting materials are used, their modulus of compression must be measured in order to correct the coefficient values K_{bcm}

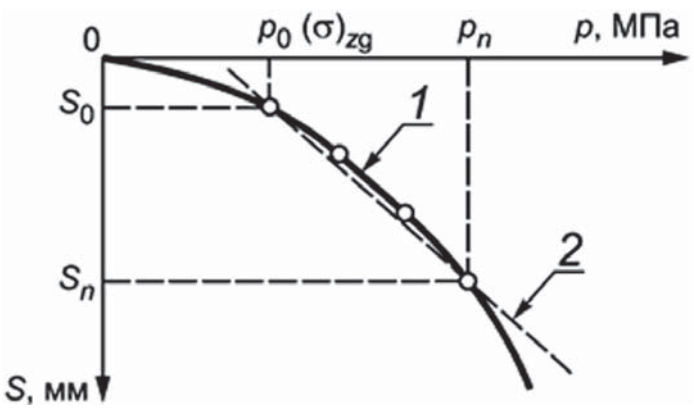


Рис. 9. График зависимости «осадка – нагрузка»
Fig. 9. Load-settlement curve

Выводы

1. Наиболее достоверным методом определения деформационных характеристик крупнообломочных грунтов при глубине их залегания свыше 3,0–5,0 м или при близком расположении уровня грунтовых вод являются штамповые испытания в скважине. Основная проблема проведения таких испытаний связана с невозможностью зачистки забоя скважины с необходимой точностью выравнивания поверхности до 1–2 мм. Для решения этой задачи предложено заливать на дно скважины быстротвердеющий композитный материал БКМ для создания надежного контакта штампа с грунтом, так называемый «жидкий штамп».

2. Контактный слой должен обладать высокой пластичностью для заполнения неровностей поверхности забоя скважины, временем схватывания, достаточным для монтажа штампа, высокой прочностью за небольшое время твердения (12–24 часа). Кроме того, материал должен обладать незначительной сжимаемостью для обеспечения полной передачи нагрузки от штампа на грунт и возможностью его применения при температурах, характерных для глубин проведения штамповых испытаний (8–10 °С).

3. На основе выполненных исследований установлено, что в наибольшей степени вышеперечисленным требованиям соответствует быстротвердеющий композитный материал БКМ – бетонная смесь, применяемая в строительстве для ремонта ответственных конструкций – MasterFlow 928, производимая фирмой BASF в различных регионах РФ. Дальнейшие исследования проведены с этим материалом.

4. На образцах натурального размера диаметром 290 мм и высотой от 50 до 150 мм был выполнен комплекс лабораторных исследований сжимаемости БКМ в зависимости от сроков твердения, толщины укладываемого слоя, наличия в нижней части образца обломков грунтов и др. По результатам испытаний установлено, что модуль деформации БКМ растет с увеличением времени твердения и толщины слоя. На основе полученных зависимостей выполнены определения собственной сжимаемости контактного слоя, которые в дальнейшем учтены при разработке методики расчета модуля деформации по результатам штамповых испытаний.

5. Для проведения штамповых испытаний были разработаны простые способы доставки БКМ на забой скважины. Первый способ заключается в использовании бурового инструмента – желонки или бурового стакана, на конце которого устраивается временное дно из полимерной пленки, разрушаемое путем сброса и резкой остановки снаряда перед дном скважины. Второй способ заключается в доставке приготовленной порции БКМ в полимерном контейнере, закрепленном на буровых трубах, через которые передается давление на штамп.

6. Для проверки применимости требований ГОСТ 20276.1-2020 [7] для проведения штамповых испытаний с применением БКМ на трех опытных площадках в различных грунтовых условиях были выполнены параллельные испытания штампами различных конструкций: плоским штампом (тип III) площадью 600 см² без БКМ и 700 см² с БКМ, винтовым штампом площадью 600 см² (тип IV). Всего выполнено 18 штамповых испытаний в галечниках с песчаным заполнителем, щебне с глинистым заполнителем и щебне с заполнителем из известковой муки. Проведенные испытания показали возможность использования требований ГОСТ 20276.1-2020 [7] для выполнения испытаний этим методом.

7. С целью оценки достоверности получаемых значений деформационных характеристик при испытаниях с применением БКМ на двух специально отсыпанных площадках (участки

№ 1 и 2) были проведены штамповые испытания грунтов с поверхности штампами различных конструкций: плоским штампом площадью 5000 см² (тип I) [7], плоским штампом площадью 600 см² без БКМ (тип III) и плоским штампом площадью 700 см² с применением БКМ. Всего выполнено 12 штамповых испытаний.

Сопоставление данных параллельных испытаний показало хорошую сходимость штампов с БКМ с результатами «эталонных» испытаний штампов площадью 5000 см² при испытаниях с поверхности и винтовых штампов площадью 600 см² при испытаниях в скважине. Максимальное расхождение полученных значений модуля деформации не превысило 14 %.

8. На основе выполненных экспериментальных исследований были разработаны методика и «Рекомендации по проведению штамповых испытаний с использованием быстротвердеющих материалов на контакте штампа с грунтом» [13].

Список литературы

1. Сергеев Е.М., Голодковская Г.А., Зиангиров Р.С. и др. Грунтоведение. Москва: Изд-во МГУ; 1973.
2. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83* [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456054206>
3. Болдырев Г.Г. Мельников А.В., Новичков Г.А., Колесников А.С. Интерпретация результатов полевых испытаний с целью определения деформационных характеристик грунтов. Инженерные изыскания. 2014;(5-6):86-97.
4. Труфанов А.Н., Терентьевич А.А., Климов В.Я., Ханович И.И., Букин А.Г. Способ для испытания грунтов плоским штампом в скважине и устройство для его осуществления. Патент RU 2 611 045 C2. 20 Февраль 2017.
5. Мирный А.Ю. Механические свойства неоднородных грунтов как оснований и материала земляных сооружений [автореферат диссертации]. Москва; 2013.
6. Suits L.D., Sheahan T.C., Cabarkapa Z., Cuccovillo T. Automated triaxial apparatus for testing unsaturated soils. Geotechnical Testing Journal. 2006;29(1):12310. <https://doi.org/10.1520/gtj12310>
7. ГОСТ 20276.1-2020. Грунты. Метод испытания штампом. Москва: Стандартинформ; 2020.
8. Труфанов А.Н., Ростовцев А.В., Тоцкий С.П. Способ полевого определения деформационных характеристик грунтов. Патент RU 2 272 102 C1. 20 Март 2006.
9. Ростовцев А.В., Труфанов А.Н. Инженерно-геологические изыскания на больших глубинах (из опыта изысканий при строительстве Общественно-делового центра «Охта», Санкт-Петербург). В: Фундаменты глубокого заложения и проблемы освоения подземного пространства: материалы Международной научной конференции, Пермь, 18-19 октября 2011 года. Пермь: Пермский государственный национальный исследовательский университет; 2011, с. 51-58.
10. ГОСТ 5180-2015. Грунты. Методы лабораторного определения физических характеристик. Москва: Стандартинформ; 2016.
11. ГОСТ 32696-2014. Трубы стальные бурильные для нефтяной и газовой промышленности. Технические условия (ISO 11961:2008, MOD). Москва: Стандартинформ; 2015.
12. ГОСТ 18599-2001. Трубы напорные из полиэтилена. Технические условия. Минск: БелГИСС: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; 2002.
13. Определение деформационных характеристик крупнообломочных грунтов с использованием быстротвердеющих материалов на контакте штампа с грунтом. Отчет НИОКР. Москва: АО «НИЦ «Строительство», НИИОСП им. Н.М. Герсевича; 2021 г., № НИОКТР 121062700017-9, Пер. № ИКРБС.

References

1. *Sergeev E.M., Golodkovskaya G.A., Ziangirov R.S. et al.* Soil science. Moscow: Publishing House of Moscow State University; 1973. (In Russian).
2. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures. Updated version SNiP 2.02.01-83* [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456054206>. (In Russian).
3. *Boldyrev G.G., Mel'nikov A.V., Novichkov G.A., Kolesnikov A.S.* Interpretation of the results of field tests in order to determine the deformation characteristics of soils. *Inzhenernye izyskaniya = Engineering surveys.* 2014;(5-6):86–97. (In Russian).
4. *Trufanov A.N., Terent'evich A.A., Klimov V.Ya., Khanovich I.I., Bukin A.G.* A method for testing soils with a flat stamp in a well and a device for its implementation. Patent RU No. 2 611 045 C2. 2017. Publ. date 20 February 2017. (In Russian).
5. *Mirny A.Yu.* Mechanical properties of heterogeneous soils as bases and material of earthworks [abstract of the dissertation]. Moscow; 2013. (In Russian).
6. *Suits L.D., Sheahan T.C., Cabarkapa Z., Cuccovillo T.* Automated triaxial apparatus for testing unsaturated soils. *Geotechnical Testing Journal.* 2006;29(1):12310. <https://doi.org/10.1520/gtj12310>
7. State Standard 20276.1-2020. Soils. Plate bearing test methods. Moscow: Standardinform Publ.; 2020. (In Russian).
8. *Trufanov A.N., Rostovtsev A.V., Tot'sky S.P.* Method of field determination of deformation characteristics of soils. Patent RU No. 2 272 102 C1. Publ. date 20 March 2006. (In Russian).
9. *Rostovtsev A.V., Trufanov A.N.* Engineering and geological surveys at great depths (from the experience of surveys during the construction of the Okhta Public and Business Center, St. Petersburg). In: Foundations of deep laying and problems of underground space development. Proceedings of the International Scientific Conference, Perm, October 18–19, 2011. Perm: Perm State National Research University; 2011, pp. 51–58. (In Russian).
10. State Standard 5180-2015. Soils. Laboratory methods for determination of physical characteristics. Moscow: Standardinform Publ.; 2016. (In Russian).
11. State Standard 32696-2014. Steel drill pipes for petroleum and natural gas industries. Specifications. Moscow: Standardinform Publ.; 2015. (In Russian).
12. State Standard 18599-2001. Polyethylene pressure pipes. Specifications. Minsk: BelGISS: Interstate Council for Standardization, Metrology and Certification; 2002. (In Russian).
13. Determination of deformation characteristics of large-block soils using fast-hardening materials on the contact of the stamp with the soil. R&D report. Moscow: JSC Research Center of Construction, NIIOSP named after N.M. Gersevanov; 2021. No. R&D 121062700017-9, Reg. No. IKRBS. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Александр Васильевич Ростовцев, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории методов исследования грунтов НИИОСП им. Н.М. Герсевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: 7201749@gmail.com

тел.: +7 (903) 720-17-49

Alexander V. Rostovtsev, Cand. Sci. [Engineering], Leading Researcher of Laboratory of Soil Research Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: 7201749@gmail.com

tel.: +7 (903) 720-17-49

УДК 67.02

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-98-106](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-98-106)

EDN: ILVGBI

ОСОБЕННОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ СВАРКИ С КАПЛЕПЕРЕНОСОМ ПРИ РЕМОНТЕ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

М.З. ЗАРИПОВ, канд. техн. наук

З.Р. МУХАМЕТЗЯНОВ[✉], д-р техн. наук

А.Н. ПУДОВКИН, канд. техн. наук

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», ул. Космонавтов, д. 1, г. Уфа, 450064,
Российская Федерация

Аннотация

Введение. Ремонт трубопроводов, находящихся под давлением перекачиваемой среды, с применением сварки актуален для снижения трудоемкости выполнения работ. Но при этом возрастает риск снижения безопасности производства работ. Для решения этой проблемы в статье рассматривается возможность применения технологических процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель.

Цель исследования: определение основных параметров технологических процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель, влияющих на безопасность сварочных работ.

Материалы и методы. Для достижения поставленной задачи была использована разработанная авторами теоретическая модель расчета рабочей толщины стенки трубопровода, находящегося под давлением, при расчетах на прочность в процессе сварки. Также использовалась зависимость толщины стенки трубы от края проплавленного отверстия от внутреннего давления.

Результаты. Установлено, что применение сварочных процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель металла позволяет управлять глубиной проплавления стенки за счет изменения параметров режима. Это значительно повышает безопасность проведения сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, по сравнению с другими видами сварки. Разработанные нами технологические процессы сварки обеспечивают безопасность производства сварочных работ за счет достижения плавного и точного контролирования глубины проплавления стенки трубопровода. Достигается это правильным подбором базового и пикового токов, управлением процессом переноса капель по напряжению на дуге, управлением количеством наплавляемого металла и температуры нагрева свариваемых конструкций.

Выводы. За последнее время разработан ряд ремонтных технологий, предназначенных для повышения качества сварных швов при строительстве и ремонте магистральных трубопроводов. Полученные с высокой степенью достоверности результаты исследований по разработке технологии механизированной сварки с управляемым переносом капель позволяют рекомендовать эту технологию в качестве эффективного способа повышения безопасности производства сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред.

Ключевые слова: ремонт трубопроводов, механизированная сварка, управляемый каплеперенос, безопасность сварочных работ, глубина проплавления

Для цитирования: Зарипов М.З., Мухаметзянов З.Р., Пудовкин А.Н. Особенности применения механизированной сварки с каплепереносом при ремонте эксплуатируемых трубопроводов. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):98–106. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-98-106](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-98-106)

Вклад авторов

Зарипов М.З. – определена, обоснована и разработана технология механизированной сварки с управляемым переносом капель для трубопроводов, находящихся под давлением перекачиваемых сред.
 Мухаметзянов З.Р. – исследованы и предложены способы повышения безопасности производства сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред.
 Пудовкин А.Н. – моделирование параметров технологии механизированной сварки с управляемым переносом капель.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.04.2023

Поступила после рецензирования 21.04.2023

Принята к публикации 25.04.2023

SPECIFIC FEATURES OF APPLYING MACHINE WELDING WITH DROP TRANSFER IN REPAIR OF OPERATING PIPELINES

M.Z. ZARIPOV, Cand. Sci. (Engineering)

Z.R. MUKHAMETZANOV✉, Dr. Sci. (Engineering)

A.N. PUDOVKIN, Cand. Sci. (Engineering)

Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov str., 1, Ufa, 450064, Russian Federation

Abstract

Introduction. Repair of pipelines under pressure of pumped media by means of welding is relevant to reduce the complexity of work. However, it may reduce the safety of work. To solve this issue, the authors consider applying the technological processes of machine welding with controlled drop transfer.

Aim. To determine the main parameters of technological processes of machine welding with controlled drop transfer, affecting the safety of welding.

Materials and methods. The authors developed a theoretical model for calculating the working thickness of a pipeline wall under pressure which they used for calculating the strength during welding. The dependence of the pipeline wall thickness at the edge of the penetrated hole on the internal pressure was also used in the calculations.

Results. It was found that machine welding with controlled transfer of metal drops allows the wall penetration depth to be regulated by changing the welding variables. This significantly increases the safety of welding on pipelines under pressure of pumped media, compared to other types of welding. The developed welding processes ensure the safety of welding operations by means of a smooth and accurate control of the wall penetration depth. This is achieved by the correct selection of the background and peak current, control of the drop transfer process by arc voltage, control of the amount of weld metal and the heating temperature of welded structures.

Conclusion. Recently, a number of repair technologies have been developed to improve the quality of welds in the construction and repair of trunk pipelines. The highly significant results of research on the development of machine welding technology with controlled drop transfer allow this technology to be recommended as an effective way to improve the safety of welding operations on pipelines under pressure of pumped media.

Keywords: pipeline repair, machine welding, controlled drop transfer, welding safety, penetration depth

For citation: Zaripov M.Z., Mukhametzyanov Z.R., Pudovkin A.N. Specific features of applying machine welding with drop transfer in repair of operating pipelines. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):98–106. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-98-106](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-98-106)

Author contribution statements

Zaripov M.Z. – determining, substantiating and developing the technology of machine welding with controlled drop transfer for pipelines under the pressure of pumped media.

Mukhametzyanov Z.R. – investigating and proposing ways to improve the safety of welding operations on pipelines under the pressure of pumped media.

Pudovkin A.N. – modeling parameters for machine welding technology with controlled drop transfer.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 03.04.2023

Revised 21.04.2023

Accepted 25.04.2023

Для изготовления трубопроводов часто применяют низкоуглеродистую сталь. Она хорошо сваривается, почти не закаливается, слабо подвержена коррозии и потому весьма удобна для работы в элементах конструкций [1–4]. Разработка процессов механизированной сварки с управляемым переносом капель позволила управлять процессом сварки и сделать его в меньшей степени зависимым от квалификации сварщика [5]. Настройка режимов сварки конкретного сварного шва гарантирует получение требуемой глубины проплавления (провара) стенки трубопровода [6–9]. При этом формируется необходимая форма сварного шва.

При сварочных работах на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, допустимая толщина стенки трубопровода, при которой возможна сварка, равна сумме глубины проплавления ($\delta_{\text{пр}}$) и рабочей толщины (1)

$$\delta = \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{раб}}. \quad (1)$$

$\delta_{\text{раб}}$ зависит от внутреннего давления и определяется по формуле (1):

$$\delta_{\text{раб}} = \frac{P \times r}{\sigma^T},$$

где P – внутреннее давление, МПа;

r – радиус области нагрева сварочной дугой (10^{-3} м) [1];

σ^T – предел прочности металла при максимальной температуре нагрева принимается равным 5,0 МПа [1].

Данная формула выведена на основе следующей теоретической модели (рис. 1).

На рис. 2 показана форма проплавленного сваркой отверстия в стенке трубопровода, находящегося под давлением перекачиваемой среды (нефти).

Глубина проплавления (провар) ($\delta_{\text{пр}}$) при ручной сварке зависит от техники сварки (скорости перемещения сварочной дуги, угла наклона электрода). Этот параметр может колебаться от 1,5 до 2,6 мм (электроды диаметром 3 мм с основным видом покрытия),

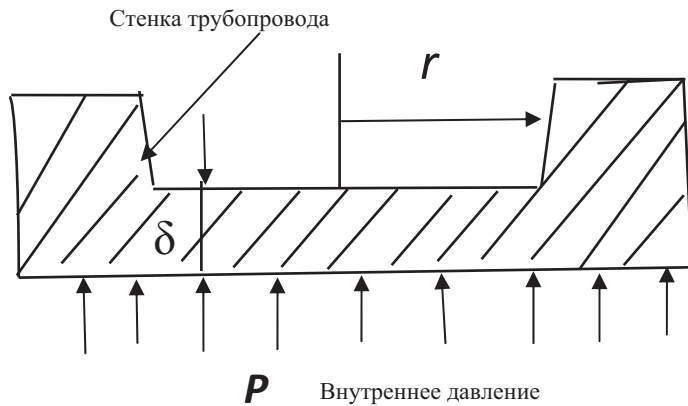
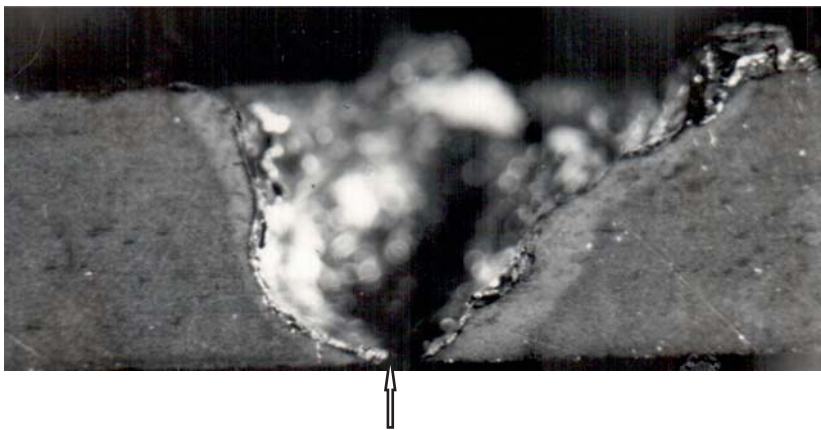


Рис. 1. Расчетная модель рабочей толщины стенки трубопровода, находящегося под давлением $[P]$, при расчетах на прочность в процессе сварки

Fig. 1. Calculation model of working wall thickness of a pipeline under pressure $[P]$, when calculating the strength in the welding process



Рабочая толщина стенки, измеряемая у края проплавленного отверстия (x5)

Рис. 2. Форма отверстия, возникающего в стенке трубопровода, находящегося под давлением, при сквозном проплавлении в процессе сварки

Fig. 2. Shape of hole in pipeline wall under pressure due to penetration in the welding process

что ограничивает возможности проведения сварочных работ, так как при этом требуется увеличивать толщину стенки трубопровода.

Рабочая толщина стенки трубопровода ($\delta_{\text{раб}}$) при внутреннем давлении $P = 6,0$ МПа равна 0,5 мм (рис. 3) [1].

Поэтому общая предельная толщина (δ) равна $2,6 + 0,5 = 3,1$ (мм). Принимая запас по величине проплавления стенки равный двум, получим допустимую толщину стенки трубопровода при сварке на трубопроводе, находящемся под давлением до 6,0 МПа, равную

$$2,6 \times 2 + 0,5 = 5,7 \text{ (мм)}.$$

Сварка методами управляемого переноса капель (STT, ВКЗ, УКП) позволяет установить такие параметры режима сварки, которые гарантируют требуемую величину проплавления металла независимо от техники сварки.

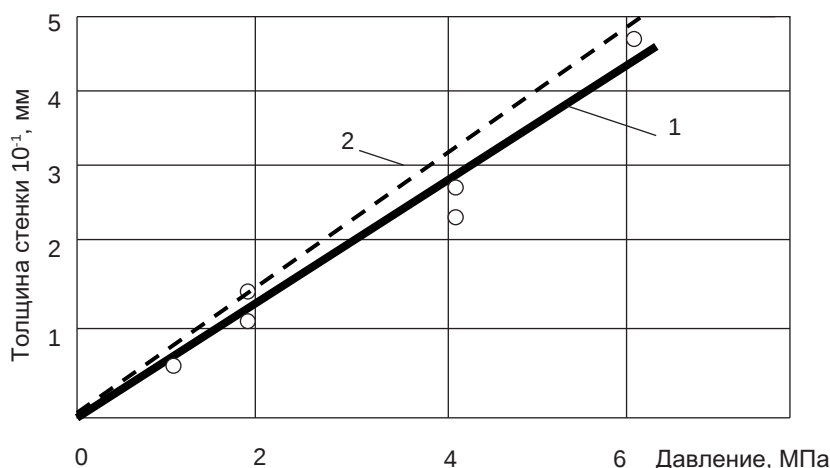


Рис. 3. Зависимость толщины стенки трубы у края проплавленного отверстия от внутреннего давления
 [1 – эксперимент; 2 – расчет]

Fig. 3. Dependence of pipeline wall thickness at the edge of penetrated hole on internal pressure
 [1 – experiment; 2 – calculation]

В этих процессах управление переносом капель осуществляется за счет подбора базового и пикового токов (STT, УКП), которые обеспечивают заданную форму шва и глубину проплавления стенки трубопровода. В процессе ВКЗ получение заданной формы шва и глубины проплавления обеспечивается изменением напряжения на сварочной дуге.

При сварке на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, данные процессы должны применяться при выполнении первого (корневого) шва, так как глубина проплавления корневого шва должна быть наименьшей (1,0–1,5 мм). Заполняющие и облицовочные слои могут быть также выполнены с помощью этого процесса. Однако низкие скорости наплавки снижают производительность сварочных работ.

Настройка параметров режима сварки производится на специальных образцах в виде катушки, вырезанной из трубы. Глубина проплавления стенки катушки будет больше, чем стенки трубы, заполненной перекачиваемой средой, из-за отсутствия теплоотвода в перекачиваемую среду. Поэтому режимы сварки на «катушке» должны обеспечивать провар не более 2,0 мм.

Режим сварки методом STT следующий [2]:

- диаметр сварочной проволоки 1,14 мм;
- расход газа 10–16 л/мин (100 % углекислый газ высшего сорта по ГОСТ 8050 [10]);
- вылет проволоки 10–15 мм;
- колебательные движения сварочной горелки в нижнем положении сварного шва.

Без поперечных колебаний в вертикальном и потолочном положениях;

- направление сварки – «на спуск»;
- полярность – обратная;
- параметр горячего старта 1,5–3,0 А;
- скорость подачи проволоки 90–120 (нижнее положение), 120–160 (вертикальное, потолочное) дюйм/мин;
- пиковый ток 400–420 А;

– базовый ток 45–55 А.

Обратная полярность увеличивает величину расплавления сварочной проволоки и уменьшает нагрев свариваемых труб, что снижает глубину проплавления стенки труб.

Технология механизированной сварки методом УКП требует большего расхода защитного газа (15–20 л³/мин), что дополнительно охлаждает сварочную ванну и уменьшает величину проплавления стенки трубопровода. В этой технологии применяется меньший вылет электродной проволоки (5–10 мм) и низкий пиковый ток (25–270 А), что снижает производительность сварки (коэффициент наплавки), но увеличивает запас прочности по глубине проплавления.

Сварка методом ВКЗ производится на постоянном токе обратной полярности. Модуляция осуществляется по напряжению от 16,5 до 18,5 В. При напряжении 16,5 В происходит касание электродной проволокой сварочной ванны и расплавление проволоки на определенную длину. При напряжении 18,5 В реализуется капельный перенос электродного металла в сварочную ванну. Поэтому модуляция по напряжению также обеспечивает заданную глубину проплавления стенки трубопровода требуемой величины (до 2 мм).

При сварке с управляемым переносом капель сварочная дуга горит в сварочной ванне, поэтому металл электрода наплавляется на стенку трубы, при этом расплавляет только поверхность стенки трубы, а расплавленный металл закрывает отверстие, которое может появиться в стенке трубопровода при сквозном проплавлении [11–14].

Для полуавтоматической сварки трубопроводов с управляемым переносом капель фирмой Lincoln Electric разработаны инверторные источники питания типа Invertec STT [3]. Они не являются ни источниками с жесткой характеристикой, ни источниками с крутопадающей характеристикой. Аппарат имеет обратную связь, которая отслеживает основные этапы переноса капли в сварочную ванну и реагирует на процессы, происходящие между электродом и сварочной ванной, изменяя величину сварочного тока. Данное оборудование может применяться как в стационарных, так и в полевых условиях.

За базовое оборудование в процессе ВКЗ были выбраны серийно выпускаемые установки типа ДК (ВД-306ДК, ВД-506ДК) с комбинированной внешней вольтамперной характеристикой для механизированной сварки. В зависимости от размеров капли электродного металла и фазы перехода капли в сварочную ванну вольтамперная характеристика может быть жесткой или падающей. Управление процессом переноса капель производится не по величине тока, а по напряжению на дуге.

Во всех процессах в качестве защитного газа используется углекислый газ, который подавляет горение, поэтому этот газ можно использовать для тушения возможного загорания при случайной разгерметизации трубопровода и выхода перекачиваемого продукта.

Для снятия остаточных напряжений в сварных швах, выполненных на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемого продукта, наиболее эффективным является применение вибрационной обработки [4–6], так как термическая обработка сварных швов неэффективна из-за теплоотвода в перекачиваемый продукт.

Выводы

1. Применение сварочных технологий механизированной сварки при сварочных работах на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред, позволит значительно повысить безопасность производства работ. Данные способы сварки делают возможным плавное и точное контролирование глубины проплавления стенки трубопровода в процессе сварки за счет изменения параметров режимов сварки, то есть контролировать параметр, определяющий безопасность проведения сварочных работ.

2. Дополнительным фактором, увеличивающим безопасность работ, является использование углекислого газа для защиты сварочной дуги, что позволяет локализовать и подавить возможное загорание выходящего пожароопасного перекачиваемого продукта.

Список литературы

1. Собачкин А.С. Проблемы безопасности сварочных работ на трубопроводах, находящихся под давлением перекачиваемых сред. Проблемы сбора, подготовки и транспорта нефти и нефтепродуктов. 2018;(3):135–140. <https://doi.org/10.17122/ntj-oil-2018-3-135-142>
2. РД 25.160.00-КТН-037-14. с изм. Сварка при строительстве и ремонте магистральных нефтепроводов. Москва: ОАО «АК "Транснефть"»; 2014.
3. Мустафин Ф.М., Блехерова Н.Г., Быков Л.И. Современные технологии сварки трубопроводов. 2-е изд., перераб. и доп. СПб.: Недра; 2010.
4. Ризванов Р.Г., Файрушин А.М., Зарипов М.З., Карпов А.Л. Повышение качества изготовления нефтехимических аппаратов применением вибрационной обработки в процессе сварки. Башкирский химический журнал. 2005;12(1):27–29.
5. Gusev E.V., Mukhametzyanov Z.R., Razyapov R.V. Technique for Determination of Rational Boundaries in Combining Construction and Installation Processes Based on Quantitative Estimation of Technological Connections. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). 2017;262:012140. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012140>
6. Файрушин А.М., Каретников Д.В., Зарипов М.З., Абдуллин Т.З., Ахтямов Р.М., Фазылов М.Р. Способ снижения остаточных сварочных напряжений в сварных соединениях металлов. Патент № RU 2424885 C1. Оpubл. 27.07.2011.
7. Tronskar J.P., Guan O.H., Tomqvist R., Bruce W.A. «Live» repair of gas pipeline with deep girth weld crack. In: ASME 2015 Pressure Vessel & Piping Conference, July 19–23, 2015, Boston, Massachusetts, USA. Vol. 6B: Materials and Fabrication. <https://doi.org/10.1115/pvp2015-46005>
8. Bruce W.F., Etheridge B.C. Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding. In: Proceedings of IPC 2012, 9th International Pipeline Conference September 24–28, 2012, Calgary, Alberta, Canada, Vol. 3: Materials and Joining. <https://doi.org/10.1115/ipc2012-90095>
9. Raschke A. Technical safety and welding simulation of welding work on high-pressure gas pipelines in operation. In: 14th Pipeline Technology Conference, 18–21 March 2019, Berlin, Germany.
10. ГОСТ 8050-85. Двуокись углерода газообразная и жидкая. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 1985.
11. Гареева О.А., Ямилов М.З., Лягов А.В., Климов П.В. Повышение безопасности эксплуатации трубопроводов, подверженных коррозионному растрескиванию. Нефтегазовое дело. 2011;9(2):58–61.
12. Насибуллина О.А., Гареев А.Г. Разработка метода оценки остаточного ресурса магистральных газопроводов, имеющих дефекты коррозионного происхождения. Нефтегазовое дело. 2016;14(2):174–178.
13. Nasibullina O.A., Gareev A.G. Destruction patterns of $\times 70$ steel sample, possessing cracks of corrosion-mechanical origin, under cyclic loading. Materials Science Forum. 2019;946:20–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.946.20>
14. Насибуллина О.А. Введение в основы коррозии. Уфа: Нефтегазовое дело; 2019.

References

1. *Sobachkin A.S.* Safety of welding works on pipelines under transporting medium pressure. Problemy sbora, podgotovki i transporta nefti i nefteproduktov = Problems of Gathering, Treatment and Transportation of Oil and Oil Products. 2018;(3):135–140. (In Russian).
2. RD 25.160.00-KTN-037-14. Welding during the construction and repair of oil trunk pipelines. Moscow: Transneft; 2014. (In Russian).
3. *Mustafin F.M., Blekherova N.G., Bykov L.I.* Modern pipeline welding technologies. 2 ed. Saint Petersburg: Nedra Publ.; 2010. (In Russian).
4. *Rizvanov R.G., Fairushin A.M., Zaripov M. Z., Karpov A.L.* Improving the manufacturing quality of petrochemical devices by using vibration treatment in the welding process. Bashkirskii khimicheskii zhurnal = Bashkir chemistry journal. 2005;12(1):27–29. (In Russian).
5. *Gusev E.V., Mukhametzyanov Z.R., Razyapov R.V.* Technique for Determination of Rational Boundaries in Combining Construction and Installation Processes Based on Quantitative Estimation of Technological Connections. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (MSE). 2017;262:012140. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/262/1/012140>
6. *Fairushin A.M., Karetnikov D.V., Zaripov M.Z., Abdullin T.Z., Akhtyamov R.M., Fazylov M.R.* Method of decreasing residual strain in welded metal joints. Patent No. RU 2424885 C1. Data publ 27 July 2011. (In Russian).
7. *Tronskar J.P., Guan O.H., Tomqvist R., Bruce W.A.* "Live" repair of gas pipeline with deep girth weld crack. In: ASME 2015 Pressure Vessel & Piping Conference, July 19–23, 2015, Boston, Massachusetts, USA. Vol. 6B: Materials and Fabrication. <https://doi.org/10.1115/pvp2015-46005>
8. *Bruce W.F., Etheridge B.C.* Further Development of Heat-Affected Zone Hardness Limits for In-Service Welding. In: Proceedings of IPC 2012, 9th International Pipeline Conference September 24–28, 2012, Calgary, Alberta, Canada, Vol. 3: Materials and Joining. <https://doi.org/10.1115/ipc2012-90095>
9. *Raschke A.* Technical safety and welding simulation of welding work on high-pressure gas pipelines in operation. In: 14th Pipeline Technology Conference, 18–21 March 2019, Berlin, Germany.
10. State Standard 8050-85. Gaseous and liquid carbon dioxide. Specifications. Moscow: Standards Publishing House; 1985. (In Russian).
11. *Gareeva O.A., Yamilev M.Z., Lyagov A.B., Klimov P.V.* Improving the safety of operation of pipelines subject to corrosion cracking. Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering. 2011;9(2):58–61. (In Russian).
12. *Nasibullina O.A., Gareev A.G.* Development of a method for estimating the residual life of main gas pipelines with defects of corrosive origin. Neftegazovoe delo = Petroleum Engineering 2016;14(2):174–178. (In Russian).
13. *Nasibullina O.A., Gareev A.G.* Destruction patterns of $\times 70$ steel sample, possessing cracks of corrosion-mechanical origin, under cyclic loading. Materials Science Forum. 2019;946:20–24. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.946.20>
14. *Nasibullina O.A.* Introduction to the basics of corrosion. Ufa: Neftegazovoe delo Publ.; 2019. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Марс Зульфатович Зарипов, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Оборудование и технологии сварки и контроля» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа
e-mail: mzzaripov@mail.ru

Mars Z. Zaripov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Equipment and Technologies of Welding and Control, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa
e-mail: mzzaripov@mail.ru

Зинур Ришатович Мухаметзянов✉, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры «Автомобильные дороги, мосты и транспортные сооружения» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа
e-mail: zinur-1966@mail.ru
тел.: +7 (917) 780-35-05

Zinur R. Mukhametzyanov[✉], Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Department of Highways and Structural Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa
e-mail: zinur-1966@mail.ru
tel.: +7 (917) 780-35-05

Александр Николаевич Пудовкин, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Строительные конструкции» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа
e-mail: 11pk@rambler.ru

Alexander N. Pudovkin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Building Constructions, Ufa State Petroleum Technical University, Ufa
e-mail: 11pk@rambler.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 539.3

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-107-115](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-107-115)

EDN: RUQQUT

ДЕФОРМИРОВАНИЕ КЛАДКИ ИЗ КРУПНОФОРМАТНЫХ КАМНЕЙ

В.И. ОБОЗОВ[✉], д-р техн. наук

О.И. ПОНОМАРЕВ, канд. техн. наук

А.Ю. ИВАНОВА

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

Аннотация

Введение. Исследуется напряженно-деформированное состояние кладки стен из крупноформатных керамических камней с вертикальными швами «паз-гребень» насухо.

Цель. Исследование картины распределения вертикальных напряжений в кладке из крупноформатных керамических камней с вертикальными швами «паз-гребень», не заполненными раствором.

Материалы и методы. Исследование выполнено на модели участка стены. Численное исследование напряженного состояния кладки фрагмента стены при сосредоточенной нагрузке выполнено для кладки с цепной перевязкой рядов. Фрагмент стены моделировался объемными конечными элементами.

Результаты. Установлено, что под сосредоточенной нагрузкой деформируемая зона имеет вид треугольника с вершиной под нагрузкой и расширяющейся по мере удаления от места приложения нагрузки. На основании проведенных исследований предложен приближенный способ определения напряжений сжатия в камнях кладки с цепной перевязкой рядов. При сосредоточенной нагрузке зона распределения сжимающих напряжений в кладке имеет вид треугольника. Установлены особенности распределения напряжений сжатия в цепной кладке стен из крупноформатных камней с вертикальными швами насухо при сосредоточенной нагрузке.

Выводы. Проведенные исследования показали, что существующие методы расчета сплошной кладки не подходят для расчета кладки с вертикальными швами в «паз-гребень» насухо, потому что последняя представляет собой дискретно-континуальную систему.

Ключевые слова: стена, цепная кладка, стык «паз-гребень», напряжения сжатия, сосредоточенная нагрузка, модель, фрагмент стены, объемные конечные элементы, треугольник распределения напряжений

Для цитирования: Обозов В.И., Пономарев О.И., Иванова А.Ю. Деформирование кладки из крупноформатных камней. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;37(2):107–115. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-107-115](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-107-115)

Вклад авторов

Обозов В.И. – исследования на моделях, приближенный метод распределения напряжений сжатия в камнях кладки, написание основного текста.

Пономарев О.И. – введение.

Иванова А.Ю. – оформление статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.04.2023

Поступила после рецензирования 15.05.2023

Принята к публикации 23.05.2023

DEFORMATION OF LARGE STONES MASONRY

V.I. OBOZOV✉, Dr. Sci. (Engineering)

O.I. PONOMAREV, Cand. Sci. (Engineering)

A.Yu. IVANOVA

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

Abstract

Introduction. The paper investigates the stress-strain state of masonry walls made of large ceramic stones with dry vertical tongue and groove joints.

Aim: to study the distribution of vertical stresses in masonry of large ceramic stones with vertical tongue and groove joints not filled with mortar.

Materials and methods. The study was performed on the model of the wall section. Numerical study of the stress state of the wall masonry at a concentrated load was carried out for masonry with chain bond. The wall fragment was modeled by solid finite elements.

Results. It was found that under a concentrated load, the deformable zone has the form of a triangle with a vertex under load and expanding as it moves away from the load point. Based on the studies conducted, the authors of the paper have proposed an approximate method for determining compression stresses in masonry stones with chain bond. When the load is concentrated, the zone of distribution of compressive stresses in the masonry has the form of a triangle. The study established the characteristics of the distribution of compressive stresses in chain masonry of walls made of large stones with dry vertical joints at a concentrated load.

Conclusions. The study shows that the existing methods of calculating solid masonry are not suitable for calculating masonry with dry vertical tongue and groove joints because the latter comprise a discrete-continual system.

Keywords: wall, chain masonry, tongue and groove joint, compression stresses, concentrated load, model, wall fragment, solid finite elements, stress distribution triangle

For citation: Obozov V.I., Ponomarev O.I., Ivanova A.Yu. Deformation of large stones masonry. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):107–115. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-107-115](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-107-115)

Author contribution statements

Obozov V.I. – model survey, approximate method of distributing compression stresses in masonry stones, drafting of the manuscript.

Ponomarev O.I. – introduction.

Ivanova A.Yu. – preparation and creation of published work.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.04.2023

Revised 15.05.2023

Accepted 23.05.2023

Введение

За последние десятилетия в нашей стране и за рубежом проведено большое количество теоретических и экспериментальных исследований, касающихся оценки напряженно-деформированного состояния кладки стен зданий и сооружений из кирпича и камня, в том числе крупноформатного керамического, с учетом влияния вертикальных швов кладки [1–11], то есть при рассмотрении двухосного напряженного состояния.

Использование такого подхода при построении расчетных моделей предусматривает возможность повышения расчетных нагрузок на конструкции зданий за счет учета работы не только горизонтальных, но и вертикальных швов. Анализ проведенных научных исследований показал, что во всех работах авторы рассматривают кладку из кирпича и камня с полностью заполненными раствором вертикальными швами.

Такая кладка применялась в несущих стенах зданий исторической застройки, в основном в кирпичных зданиях. Однако вертикальный шов кладки из камня в условиях стройплощадки заполнить крайне сложно. Поэтому раствор в вертикальных швах кладки из камня с плоскими вертикальными гранями заполняется не более чем на 20–30 %. В целях исключения продуваемости такие стены возводились с последующим оштукатуриванием двух сторон, а также с облицовкой.

Учитывая большую сложность заполнения раствором вертикальных швов кладки из камня, в последние годы при кладке стен зданий из камня применяются кладочные изделия с пазогребневым соединением вертикальных швов.

Вертикальные швы в такой кладке не заполняются раствором, поэтому между камнями остается зазор в несколько миллиметров. Продуваемость такой кладки значительно меньше, чем в кладке из камней с плоскими вертикальными гранями. Стены из такой кладки также штукатурятся, облицовываются или защищаются наружной системой теплоизоляции.

На рис. 1 показана внутренняя часть стены, возведенная из различных материалов – лицевой кирпичный слой толщиной 0,5 кирпича и основной слой из крупноформатного керамического камня.

В данном случае кладка защищена от внешних температурно-влажностных воздействий лицевым кирпичным слоем и эффективным утеплителем, толщина которого определяется теплотехническим расчетом.

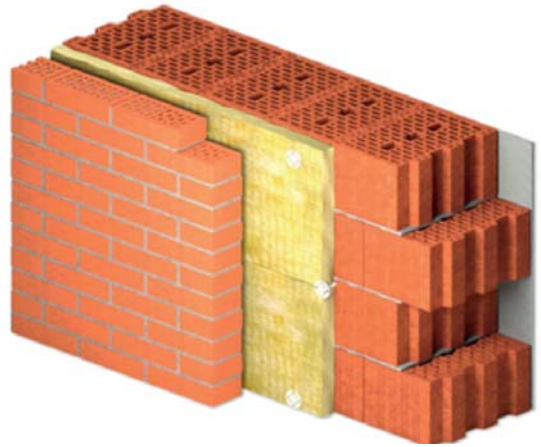


Рис. 1. Пример стены из крупноформатных камней
Fig. 1. Example of large stone masonry wall

Материалы и методы

Исследования с использованием конечно-элементных моделей

Исследуется напряженно-деформированное состояние кладки несущих стен из крупноформатных керамических камней с вертикальными швами «паз-гребень». Исследовать влияние вертикальных швов «паз-гребень» на напряженно-деформированное состояние кладки под нагрузкой возможно либо экспериментально, либо на компьютерных объемных моделях. Экспериментально влияние не заполненных раствором вертикальных швов (соединение «паз-гребень») возможно сопоставлением результатов испытания образцов кладки двух типов: с заполненными раствором вертикальными швами и с вертикальными швами «паз-гребень» насухо.

Здесь влияние не заполненных раствором швов на напряженно-деформированное состояние кладки из крупноформатных керамических камней исследовано на объемных конечно-элементных моделях фрагментов стен. В [11] разработано два способа построения конечно-элементных объемных моделей:

- прямой метод, когда блоки и растворные швы в модели стены задаются объемными конечными элементами;
- комбинированный метод, когда в модели стены блоки задаются объемными конечными элементами, а растворные швы – пластинчатыми конечными элементами.

Для исследования кладки стен с вертикальными швами между блоками «паз-гребень» насухо использован прямой метод моделирования кладки фрагмента стены. При этом толщина вертикального зазора блоков в кладке принята равной 1 см. В программных комплексах для расчета конечно-элементных моделей используется метод перемещений, поэтому нельзя задавать жесткость КЭ равной 0. В исследованных моделях модуль деформации условного раствора в вертикальных швах был задан равным 1. По сравнению с модулем деформации материала керамических блоков это 0. Поскольку керамические блоки имеют большое количество вертикальных пустот, учитывалось приведенное значение модуля деформации материала блоков равное 15000 кГс/см^2 . В горизонтальных швах кладки в моделях фрагмента стены был принят раствор марки 100.

Конечно-элементная модель фрагмента стены рассчитывалась на сосредоточенную нагрузку.

Граничные условия были приняты следующими: боковые вертикальные и верхняя горизонтальная грань стены считались свободными без наложенных связей. В нижней опорной грани на узлы конечных элементов были наложены связи, препятствующие перемещениям вдоль координатных осей X , Y , Z . Общий вид модели приведен на рис. 2.

Расчет такой модели на сосредоточенную нагрузку выполнен в двух вариантах: с заполненными раствором вертикальными швами между блоками, когда вертикальные швы раствором не заполнены. Анализ результатов этих расчетов показал, что характер распределения напряжений этих вариантов отличается незначительно. Количественно же, например, вертикальные сжимающие напряжения в варианте с незаполненными вертикальными швами несколько выше.

С целью получения картины распределения вертикальных напряжений в кладке только от внешней нагрузки были произведены дополнительные расчеты этих моделей с невесомыми

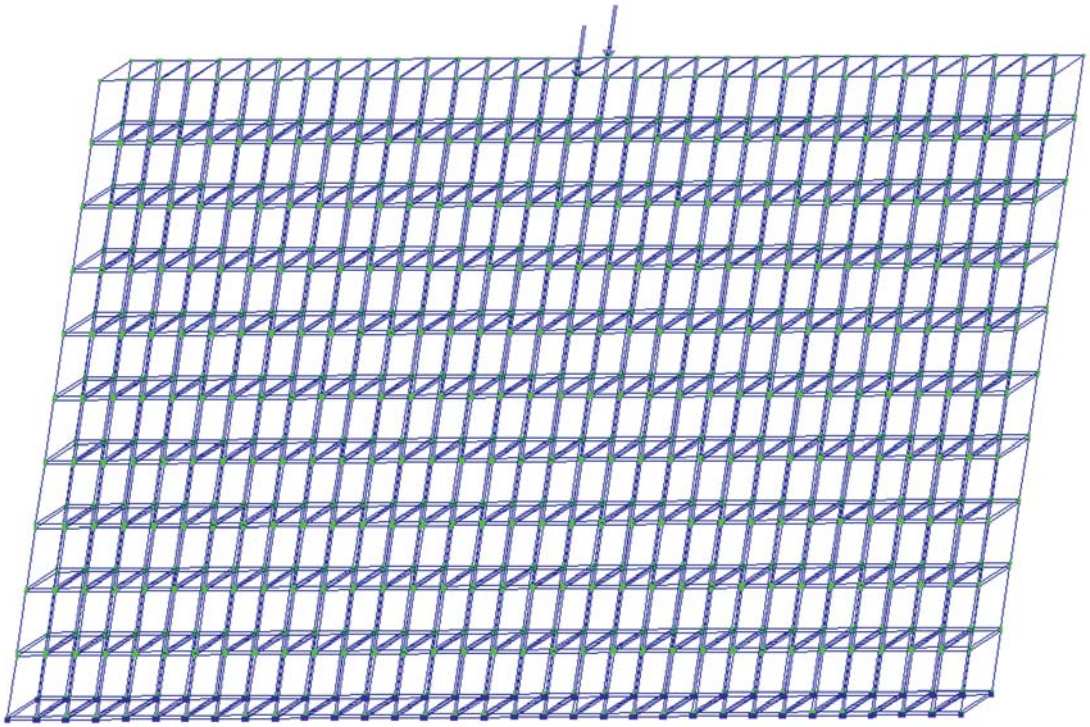


Рис. 2. Конечно-элементная модель фрагмента стены из крупноформатных керамических камней
Fig. 2. Finite-element model of a fragment of large stone masonry wall

материалами кладки. Расчеты модели фрагмента стены были произведены с незаполненными раствором вертикальными швами на сосредоточенную вертикальную нагрузку (рис. 3) и с заполненными вертикальными швами (рис. 4). На рис. 3 и 4 приведены изополя вертикальных напряжений в кладке N_z . В обоих случаях четко просматривается зона распределения вертикальных сжимающих напряжений в виде треугольника с вершиной в точке приложения сосредоточенной нагрузки. При этом наблюдается уменьшение напряжений с удалением от места приложения нагрузки и к боковым граням зоны распространения вертикальных напряжений от нагрузки.

Угол треугольной зоны распространения сжимающих напряжений в кладке определяется размером блока. Если обозначить высоту блока через h , а больший размер блока через $2l$, то угол зоны распространения вертикальных сжимающих напряжений будет равен $\operatorname{tg} \varphi = h/l$.

Приближенный способ определения напряжений сжатия в камнях кладки со стыками «паз-гребень»

Кладка стен из крупноформатных керамических камней с вертикальными швами в «паз-гребень» насухо представляет собой дискретно-континуальную систему, в которой ряды блоков являются дискретными, а континуальность кладки обеспечивают горизонтальные растворные швы.

Если пренебречь влиянием горизонтальных растворных швов, то можно расписать значения вертикальных сжимающих напряжений блоков в долях от сосредоточенной нагрузки P в пределах треугольной зоны с углом 2φ в вершине треугольника.

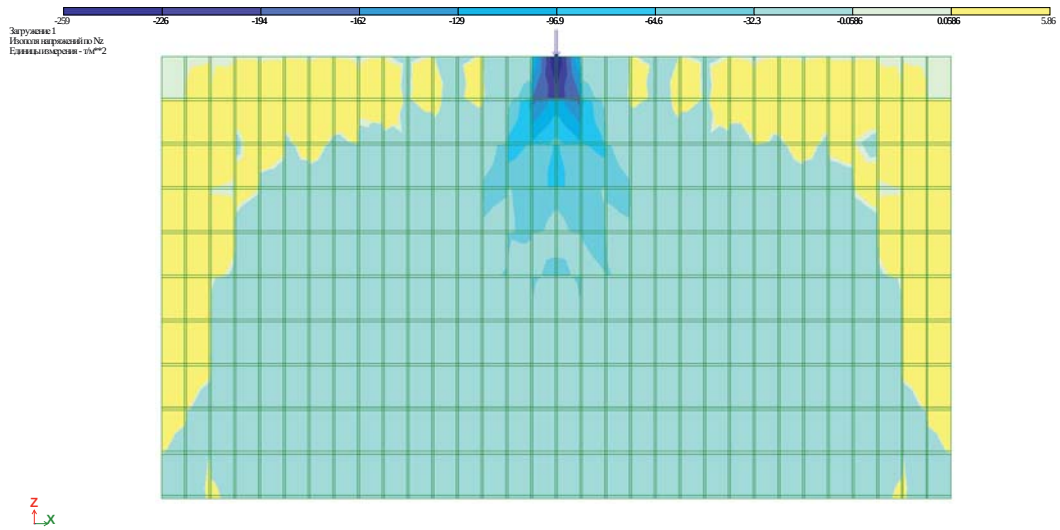


Рис. 3. Распределение вертикальных напряжений при незаполненных вертикальных швах
Fig. 3. Distribution of vertical stresses in dry vertical joints

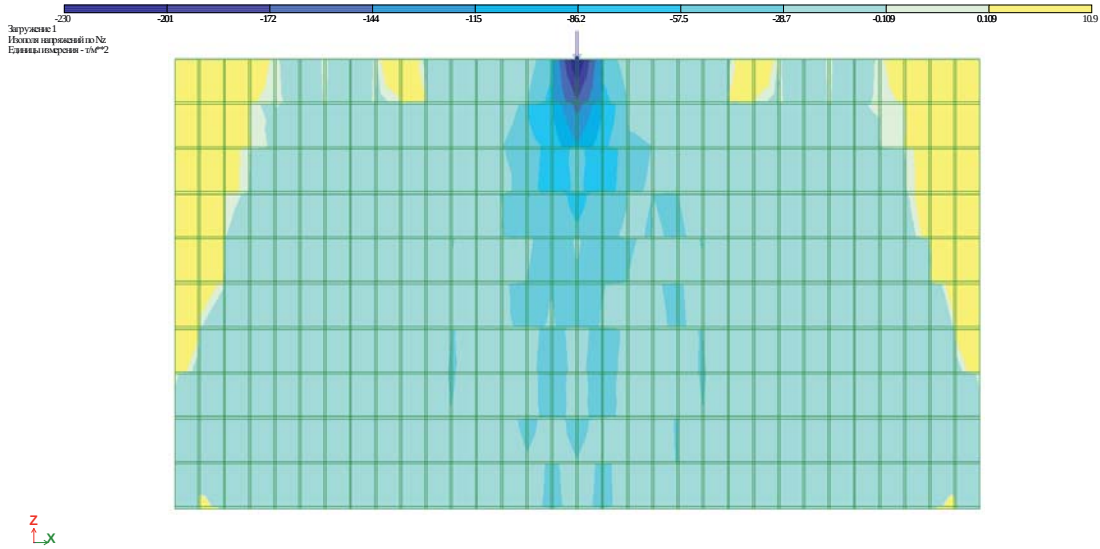


Рис. 4. Распределение вертикальных напряжений при заполненных вертикальных швах
Fig. 4. Distribution of vertical stresses in mortar vertical joints

Рассмотрим случай цепной кладки из блоков в один камень. Будем считать, что усилия с каждого блока передаются на два блока, расположенных под ним. Значения усилий в долях от сосредоточенной нагрузки P в виде дроби в блоках треугольной зоны приведены на рис. 5.

Значение усилия, приходящегося на каждый блок, записано в виде дроби. Чтобы получить напряжения, эти усилия необходимо разделить на площадь опорной грани блока. Треугольник, составленный из значений усилий в блоках, обладает некоторыми свойствами. Так, если пронумеровать ряды кладки от нуля (ряд кладки, к которому приложена сосредоточенная нагрузка) с возрастанием номера по мере удаления рядов от нагруженного, то знаменатель

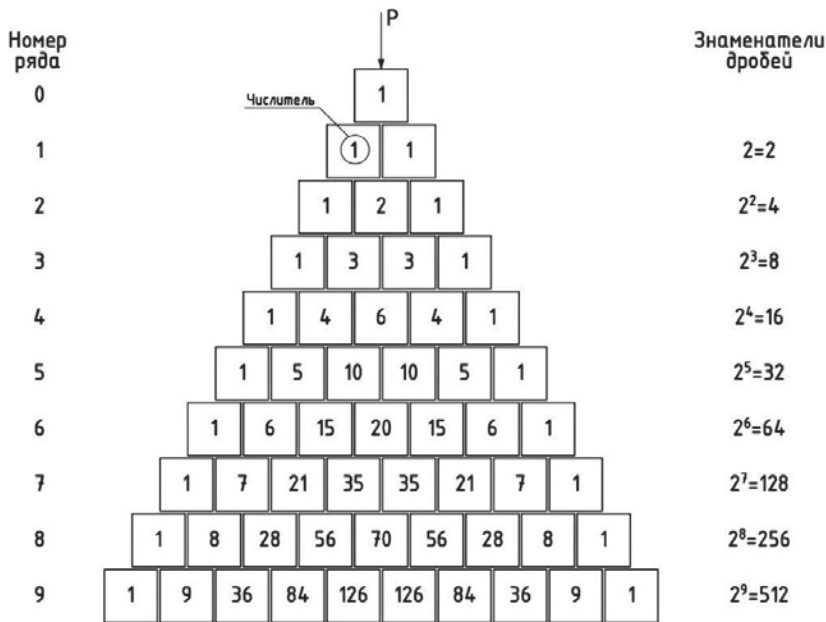


Рис. 5. Треугольник распределения вертикальных усилий в камнях кладки
Fig. 5. Vertical force distribution triangle in masonry stones

в дробях значений усилий представляет собой число 2 в степени, равной номеру ряда. На рис. 5 нанесены только числители дробных значений усилий.

Кроме того, у окаймляющих треугольную зону блоков во всех рядах в числителях дробей усилий стоит 1. Числители усилий в блоках, примыкающих к крайним камням треугольной зоны, равны номерам ряда, считая сверху вниз.

Анализ построенного треугольника усилий в блоках, попадающих в треугольную зону, показал, что вдоль ряда камней они переменны: наименьшие по краям и максимальные на вертикальной оси, проходящей через приложенную сосредоточенную нагрузку. Сумма числителей дробных чисел усилий в пределах ряда равна знаменателю этих дробей.

Полные значения напряжений в камнях определяются как сумма напряжений от нагрузки и напряжений от собственного веса кладки.

Результаты

Проведенные исследования с помощью объемного моделирования фрагмента кладки из керамических камней и растворяемых швов показали:

- распределение напряжений в кладке из керамических камней с заполненными раствором вертикальными швами и со швами «паз-гребень» насухо качественно совпадает;
- напряжения в камнях кладки со швами «паз-гребень» насухо несколько выше, чем в кладке с заполненными раствором вертикальными швами, которые способствуют большему перераспределению усилий при сосредоточенных нагрузках;
- по схеме статической работы элементов кладки из керамических камней с вертикальными швами «паз-гребень» насухо, кладка может быть отнесена к дискретно-континуальной

системе, где дискретными элементами являются камни, а горизонтальные растворные швы вносят эффект континуальности;

– получен треугольник распределения усилий между камнями от сосредоточенной нагрузки на кладку, позволяющий без расчета определять напряжения в камнях кладки с вертикальными швами в «паз-гребень».

Выводы

Проведенные исследования показали, что существующие методы расчета сплошной кладки не подходят для расчета кладки с вертикальными швами в «паз-гребень» насухо.

Список литературы

1. ГОСТ 530-2012. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. Москва: Издательство стандартов; 2012.
2. Баранова Т.И., Ласьков Н.Н., Артюшин Д.В. Сопротивление стен каменной кладки при совместном действии вертикальных и горизонтальных сил. Москва: БСТ; 1998.
3. Баранова Т.И., Туманов А.В. Метод расчета кирпичных и армокирпичных стен на основе стержневых моделей. Промышленное и гражданское строительство. 2001;(8):29–31.
4. Брусенцов Г.И., Будрейка В.Э. Экспериментально-теоретические исследования фрагментов каменной кладки при плоском напряженном состоянии. В: Исследования и методы расчета строительных конструкций. Сб. науч. тр. Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; 1985, с. 94–101.
5. Гениев Г.А., Воронов А.Н. О критериях прочности ортотропного материала типа каменной кладки при плоском напряженном состоянии. В: Исследования и методы расчета строительных конструкций. Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; 1985, с. 23–29.
6. Гениев Г.А., Курбатов А.С., Самедов Ф.А. Вопросы прочности и пластичности анизотропных материалов. Москва: Интербрук; 1993.
7. Донченко О.М., Дегтев И.А. К развитию теории трещиностойкости и сопротивления при сжатии. Известия вузов. Строительство. 2000;(10):16–20.
8. Камейко В.А., Ломова Л.М. Исследования кладки из пустотелых керамических блоков. В: Теоретические и экспериментальные исследования каменных конструкций. Сборник трудов ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; Москва: Стройиздат; 1982, с. 37–50.
9. Пангаев В.В. Разрушение сжатой каменной кладки. Изв. Вузов. Строительство. 2000;(12):7–12.
10. Поляков С.В., Чигрин С.И. производство и применение индустриальных керамических панелей. Москва: Стройиздат; 1990.
11. Обозов В.И. Методы построения объемных компьютерных моделей заполнения наружных стен каркасных зданий кладкой из крупных блоков. Строительная механика и расчет сооружений. 2018;(2):50–55.

References

1. State Standard 530-2012. Ceramic bricks and stones. General specifications. Moscow: Publishing House of Standards; 2012. (In Russian).
2. Baranova T.I., Laskov N.N., Artyushin D.V. Resistance of masonry walls under the combined action of vertical and horizontal forces. Moscow: BST Publ.; 1998. (In Russian).
3. Baranova T.I., Tumanov A.V. Method of calculating brick and reinforced brick walls on based on core models. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial And Civil Engineering. 2001;(8):29–31. (In Russian).
4. Brusentsov G.I., Budreika V.E. Experimental and theoretical studies of fragments of masonry in a flat stressed state. In: Research and methods of calculation of building structures. Collection of works. Moscow: TSNIISK named after V.A. Koucherenko; 1985, pp. 74–86. (In Russian).

5. *Geniev G.A., Voronov A.N.* On the strength criteria of an orthotropic material of the type of masonry in a flat stressed state. Research and methods of calculation of building structures. Collection of works. Moscow: TSNIISK named after V.A. Koucherenko; 1985, pp. 23–29. (In Russian).
6. *Geniev G.A., Kurbatov A.S., Samedov F.A.* Questions of strength and plasticity of anisotropic materials. Moscow: Interbruk Publ.; 1993. (In Russian).
7. *Donchenko O.M., Degtev I.A.* Towards the development of the theory of crack resistance and resistance under compression. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* = News of higher educational institutions. Construction. 2000;(10):16–20. (In Russian).
8. *Kameyko V.A., Lomova L.M.* Studies of masonry from hollow ceramic blocks. In: Theoretical and experimental studies of stone structures. Collection of works of TSNIISK named after V.A. Koucherenko. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1982, pp. 37–50. (In Russian).
9. *Pangaev V.V.* Destruction of compressed masonry. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo* = News of higher educational institutions. Construction. 2000;(12):7–12. (In Russian).
10. *Polyakov S.V., Chigrin S.I.* production and application of industrial ceramic panels. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1990. (In Russian).
11. *Obozov V.I.* Methods of constructing volumetric computer models of filling the outer walls of frame buildings with masonry from large blocks. *Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii* = Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2018;(2):50–55. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Владимир Иванович Обозов , д-р техн. наук, профессор, заведующий сектором лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий (№ 7) ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: obozov@yandex.ru
тел.: +7 (499) 174-77-91

Vladimir I. Obozov , Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Sector, Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: obozov@yandex.ru
tel.: +7 (499) 174-77-91

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

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

Александра Юрьевна Иванова, инженер лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий (№ 7) ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1701088@mail.ru
тел.: +7 (499) 170-10-88

Alexandra Yu. Ivanova, Engineer, Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 1701088@mail.ru
tel.: +7 (499) 170-10-88

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.328–41:006.354

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-116-124](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-116-124)

EDN: SYGJCS

АКТУАЛИЗАЦИЯ МЕЖГОСУДАРСТВЕННОГО СТАНДАРТА «ПЛИТЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫЕ ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ТРАМВАЙНЫХ ПУТЕЙ»

Б.С. СОКОЛОВ¹, канд. техн. наук
В.А. ТИТАЕВ^{1,2,✉}, канд. техн. наук
И.А. ЧЕРНЫЙ^{1,2}

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

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

Аннотация

Введение. Развитие городских сетей общественного транспорта в крупных городах России не обходится без модернизации и совершенствования рельсового транспорта, увеличивая его комфортабельность, провозную способность и надежность. Трамвайный транспорт экологичен, обладает высокой пассажироместимостью. Совмещение, а также пересечение рельсового и пневмоколесного транспорта в городской среде является насущной современной задачей. В связи с этим возникла потребность пересмотра и актуализации ГОСТ 19231 «Плиты железобетонные для покрытия трамвайных путей. Технические условия», обусловленная изменением требований к бетону и выпуском новых классов стальной арматуры.

Цель. Актуализация ГОСТ 19231 позволит с учетом современных требований привести изделия для трамвайной инфраструктуры к должным нормативным и технологическим параметрам.

Материалы и методы. В рамках работы произведен анализ действующих нормативных документов в области железобетонных материалов и изделий; изучены и учтены научно-исследовательские работы, а также экспертное мнение производителей данных изделий.

Результаты. Результатом работ по модернизации стандарта явилось установление технических условий, соответствующих нынешнему запросу как в части нормативных документов, так и в части научных исследований.

Выводы. Актуализированный межгосударственный ГОСТ 19231 будет способствовать более качественному проектированию и изготовлению железобетонных плит для покрытия трамвайных путей, что неизбежно приведет к повышению их надежности и долговечности.

Ключевые слова: железобетон, конструирование, испытание, приемка, метод контроля, плита покрытия трамвайных путей, фибробетон, дисперсно-армированный бетон, выносливость

Для цитирования: Соколов Б.С., Титаев В.А., Черный И.А. Актуализация межгосударственного стандарта «Плиты железобетонные для покрытия трамвайных путей». *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):116–124. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-116-124](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-116-124)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование проводилось при финансовой поддержке ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 05.04.2023

Поступила после рецензирования 18.04.2023

Принята к публикации 25.04.2023

UPDATING OF THE INTERSTATE STANDARD “REINFORCED CONCRETE SLABS FOR TRAMWAY TRACK PAVEMENTS”

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

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

I.A. CHERNY^{1,2}

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

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

Abstract

Introduction. Development of urban public transport networks in Russian cities involves modernization and improvement of rail transport to increase its traveling comfort, carrying capacity and reliability. Tram transport is environmentally friendly and has a high passenger capacity. The combination as well as the intersection of rail and pneumatic transport in the urban environment is considered to be an urgent issue. In this regard, State Standard 19231 “Reinforced concrete slabs for tramway track pavements. Specifications” is needed to be revised and updated due to changes in the requirements for concrete and emergence of new classes of steel reinforcement.

Aim. To update State Standard 19231 in order to bring products for tram infrastructure to the proper regulatory and technological parameters in compliance with current requirements.

Materials and methods. The present study involves an analysis of existing regulatory documents in the field of reinforced concrete materials and products, as well as a bibliographical research of works and expert opinions.

Results. Updating the standard resulted in the establishment of specifications that meet the current demand, both in terms of regulations and scientific research.

Conclusions. The updated interstate State Standard 19231 will contribute to a higher quality design and production of reinforced concrete slabs for tramway pavements, which will surely enhance their reliability and durability.

Keywords: reinforced concrete, design, testing, acceptance, inspection method, tramway pavement slab, fibre concrete, fiber-reinforced concrete, endurance

For citation: Sokolov B.S., Titaev V.A., Cherny I.A. Update of the interstate standard “Reinforced concrete slabs for tramway track pavements”. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):116–124. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-116-124](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-116-124)

Author contribution statements

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

Funding

The study was carried out with the financial support of FAU “FCC”.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 05.04.2023

Revised 18.04.2023

Accepted 25.04.2023

Коллективом сотрудников НИИЖБ им. А. А. Гвоздева (инж. М. В. Глушкова, канд. техн. наук Б. С. Соколов, канд. техн. наук В. А. Титаев) выполнена работа по актуализации ГОСТ 19231 «Плиты железобетонные для покрытия трамвайных путей. Технические условия».

Данный стандарт распространяется на железобетонные плиты, изготавливаемые из тяжелого бетона и предназначенные для устройства покрытий трамвайных путей колеи 1524 мм, строящихся и эксплуатируемых в районах со среднемесячной температурой наиболее холодного месяца до минус 20 °С включительно, и устанавливает требования к их изготовлению.

Плиты предназначены для укладки:

- на прямых участках пути и кривых радиусом 20 м и более с рельсами желобчатого и железнодорожного типов;
- в колее и на обочинах, а также в междупутьях шириной 3200, 3424, 3550, 3758 мм;
- на необособленном, обособленном и самостоятельном земляном полотне.

Стандарт пересмотрен в обеспечение требований ГОСТ 13015 [1], ГОСТ 26633 [2], ГОСТ 31384 [3].

Пересмотр межгосударственных стандартов ГОСТ 19231.0-83 [5] и ГОСТ 19231.1-83 [6] выполнен с учетом требований Федерального закона от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [4].

Стандарт распространяется на железобетонные плиты покрытия трамвайных путей, предназначенные для применения в сухих и водонасыщенных грунтах, и устанавливает технические требования к бетону изделий и арматуре, к изготовлению, маркировке, приемке, транспортированию и хранению железобетонных плит для покрытия трамвайных путей.

Целью пересмотра ГОСТ 19231.0 [5] и ГОСТ 19231.1 [6] является актуализация их положений в части технических условий на изготовление железобетонных плит покрытия трамвайных путей в связи с обновлением нормативной базы по производству железобетонных конструкций.

При разработке актуализированной версии ГОСТ 19231 использованы материалы исследований:

- НИР № регистрации АААА-А19-119070890044-9, дата регистрации 08/07/2019 «Выполнение научно-исследовательских работ по анализу отечественных нормативных документов и европейских стандартов, содержащих технические требования и эксплуатационные характеристики бетонов, правила их изготовления и оценки соответствия, для определения возможности прямого применения европейских стандартов в отечественной строительной» [7];

- НИОКР Рег. № НИОКТР 121061600046-3 «Отчет о научно-исследовательской работе оценка влияния бетонов на заполнителях по ГОСТ 32703 на сцепления бетона и арматуры, деформативные и прочностные свойства железобетонных конструкций» [8].

При пересмотре ГОСТ 19231.0 [5] и ГОСТ 19231.1 [6] решены следующие задачи:

- откорректирована структура и положения стандарта в связи изменениями требований основополагающих стандартов ГОСТ 1.5 [9];
- уточнены требования к правилам обеспечения единства измерений в Российской Федерации, установленным Федеральным законом от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений» [10] и документами уполномоченных федеральных органов исполнительной власти.

В ГОСТ 19231.0 [5] и ГОСТ 19231.1 [6] указаны марки изделий в зависимости от ширины, длины и дополнительных конструктивных характеристик. Прочность и класс бетона по прочности назначается только по несущей способности В30, плиты предлагается применять в сухих и водонасыщенных грунтах, при расчетной температуре наружного воздуха (средней температуре воздуха наиболее холодной пятидневки района строительства согласно СП 131.13330.2012 [11]) до минус 40 °С включительно, в грунтах и грунтовых водах с неагрессивной степенью воздействия на железобетонные изделия.

Для этого установлены требования по водонепроницаемости и морозостойкости, которые опосредованно защищают бетон от коррозии. Поэтому при пересмотре стандарта назначен определенный уровень по морозостойкости и водонепроницаемости, назначен класс бетона по прочности, гарантирующий обеспечение заданных морозостойкости и водонепроницаемости.

Кроме этого, одной из задач пересмотра межгосударственных стандартов ГОСТ 19231.0 [5] и ГОСТ 19231.1 [6] является также установление актуальных технических требований в связи с применением новых классов арматуры для армирования плит.

В разработанной редакции стандарта пересмотрена его структура на основании требований ГОСТ 1.5 [9]. Актуализированный межгосударственный стандарт содержит 9 разделов и 2 приложения. Ряд пунктов прежней редакции стандарта исключены.

В разделе 1 «Область применения» уточнено, что плиты для покрытия трамвайных путей являются сборными изделиями.

В разделе 2 «Нормативные ссылки» уточнен и расширен перечень используемых стандартов.

В раздел 3 «Термины, определения» внесен ряд редакционных изменений.

Раздел 4 «Условные обозначения» поясняет структуру маркировки плит.

Положения разделов «Технические условия» ГОСТ 19231.0 [5] и ГОСТ 19231.1 [6] сведены в один документ с образованием двух разделов: раздел 5 «Форма и основные размеры» и раздел 6 «Технические требования»; текст существенно сокращен с внесением ряда изменений.

Раздел 5 «Форма и основные размеры» содержит требования к основным геометрическим параметрам плит и монтажных приспособлений.

Раздел 6 «Технические требования» содержит перечень конструктивных и технологических требований, предъявляемых стандартами и другими нормативными документами, к плитам, а также к материалам и арматурным изделиям, используемым для плит.

Уточнены требования для достижения заданных морозостойкости и водонепроницаемости бетона плит.

Основные параметры бетона, представленные в таблице, назначены на основании требований к бетону изделий по прочности, морозостойкости и водонепроницаемости с учетом класса среды эксплуатации в соответствии с требованиями ГОСТ 31384 [3].

Раздел 7 «Правила приемки» переработан в соответствии с ГОСТ 13015 [1].

В раздел 8 «Методы контроля» внесен ряд редакционных изменений.

Раздел 9 «Маркировка, транспортирование и хранение» реструктурирован и сокращен.

В Приложении А (обязательном) в графической и табличной формах представлены типы и основные геометрические размеры плит.

В Приложении Б (обязательном) представлены схемы армирования плит.

Таблица

Основные требования к бетону плит

Table

Basic requirements for slab concrete

Тип плит	Класс по прочности на сжатие не менее	Марка по морозостойкости не менее	Марка по водонепроницаемости	Марка по истираемости
1П, 2П, 3П	B30	F ₂ 200	W8	G1

Примечание: Морозостойкость плит, эксплуатируемых при температурах наиболее холодной пятидневки наружного воздуха от –20 до –40 °С, следует принимать F₂300

В период действия стандарта процесс совершенствования смежных направлений норм, а также методик расчета и проектирования является непрерывным. Поэтому для реализации возможностей использования современных норм и правил проектирования трамвайных железобетонных плит в текст Приложения Б спецификации и выборки арматурной стали не включены. Расчет и проектирование арматурных элементов: каркасов, сеток и отдельных арматурных элементов железобетонных плит – переданы в проектные организации. По этой же причине в актуализированном стандарте нет жесткой привязки между маркой плиты и расходом, а также диаметрами арматурной стали.

В качестве примера по учету одного из важных требований применительно к расчету трамвайных плит можно привести работу [12], в которой обосновываются и описываются методы расчета железобетонных конструкций для предельного состояния по усталости. Требования по выносливости присутствуют в современной редакции свода правил [13].

Совершенствованию расчетов трамвайных плит, в частности расчету на выносливость, посвящены работы [14, 15].

В прежней редакции ГОСТ 19231.0 [5] и ГОСТ 19231.1 [6], в силу жесткой привязки марки плиты и армирования, подобные расчеты находились за рамками жестких требований стандарта.

Работы [16, 17] посвящены исследованию внедрения для трамвайных плит фибробетона и дисперсно-армированных бетонов. Исследователи однозначны в своих выводах о необходимости дальнейших исследований в области расчетов, испытания и применения современных строительных конструкций для подрельсовых оснований городского рельсового транспорта. Необходимы масштабные НИР и НИОКР, позволяющие внедрять передовые идеи в практику проектирования современных железобетонных конструкций для гражданского и транспортного строительства.

Актуализированная редакция ГОСТ одобрена и рекомендована к утверждению на заседании научно-технического совета НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство».

В ходе состоявшегося публичного обсуждения актуализированного ГОСТ получены предложения, которые были частично или полностью учтены в новой редакции стандарта.

В частности, предлагалось рассмотреть вопрос о внесении в актуализированный ГОСТ 19231 изменений, касающихся использования крупного заполнителя для бетона, щебня, щебня из гравия и гравия из плотных горных пород по ГОСТ 32703 [18] равнозначно с ГОСТ 8267 [19]. Данное предложение было отклонено в связи с тем, что в стандарте ГОСТ 32703 [18] отсутствует ряд требований к материалам, гарантирующим обеспечение долговечности бетонных изделий, отвечающей требованиям ГОСТ 27751 [20].

Авторы статей [21–23] отмечают, что исследования в области прочности и деформативности бетона при различных подходах к нормированию инертных заполнителей следует продолжить и расширить.

Актуализированный межгосударственный ГОСТ 19231 будет способствовать более качественному проектированию и изготовлению железобетонных плит для покрытия трамвайных путей, что неизбежно приведет к повышению их надежности и долговечности, а также повысит безопасность городского рельсового транспорта.

Список литературы

1. ГОСТ 13015-2012. Изделия бетонные и железобетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения. Москва: Стандартинформ; 2018.
2. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019.
3. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования. Москва: Стандартинформ; 2018.
4. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: Федеральный закон, 30 дек. 2009 г., № 384-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-30122009-n-384-fz-tekhnicheskii/>
5. ГОСТ 19231.0-83. Плиты железобетонные для покрытий трамвайных путей. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 1984.
6. ГОСТ 19231.1-83. Плиты железобетонные для покрытий трамвайных путей. Конструкция и размеры. Москва: Издательство стандартов; 1983.
7. Выполнение научно-исследовательских работ по анализу отечественных нормативных документов и европейских стандартов, содержащих технические требования и эксплуатационные характеристики бетонов, правила их изготовления и оценки соответствия, для определения возможности прямого применения европейских стандартов в отечественной строительной индустрии. Москва: АО «НИЦ «Строительство». НИР Рег. № АААА-А19-119070890044-9; 2019.
8. Отчет о научно-исследовательской работе оценка влияния бетонов на заполнителях по ГОСТ 32703 на сцепления бетона и арматуры, деформативные и прочностные свойства железобетонных конструкций. Москва: АО «НИЦ «Строительство». НИОКР Рег. № 121061600046-3; 2021.
9. ГОСТ 1.5-2001. Стандарты межгосударственные, правила и рекомендации по межгосударственной стандартизации. Общие требования к построению, изложению, оформлению, содержанию и обозначению. Москва: Стандартинформ; 2010.
10. Об обеспечении единства измерений: Федеральный закон, 26 июня 2008, № 102-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=398044>
11. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Москва: Минстрой России; 2020.
12. Шарипов Р.Ш., Зенин С.А., Крылов С.Б., Волков Ю.С. Оценка методов расчета железобетонных конструкций для предельных состояний по усталости. Вестник НИЦ «Строительство». 2020;27(4):148–159. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-148-159](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-148-159)
13. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2019.
14. Захаров В.Б. Разработка и исследование работоспособности конструкции железобетонного под-рельсового основания для пути городского наземного рельсового транспорта [диссертация]. Санкт-Петербург; 2002.
15. Султанов Н.Н. Техно-экономическое обоснование перспективных конструкций трамвайных путей [диссертация]. Санкт-Петербург; 2015.
16. Деревянко В.Н., Саламаха Л.В., Кулачко Е.А., Гопайца В.А. Разработка и исследование дисперсно-армированных бетонов для производства трамвайных плит. Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. 2011;[9]:4–8.

17. Дудкин Е.П., Параскевопуло Ю.Г., Султанов Н.Н. Использование фибробетона в конструкции трамвайных путей. Транспортное строительство. 2012;(3–4):77–79.
18. ГОСТ 32703-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и гравий из горных пород. Технические требования. Москва: Стандартинформ; 2019.
19. ГОСТ 8267-93. Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2018.
20. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2019.
21. Павлова И.П. О влиянии заполнителей на модуль упругости бетона. В: Напрягающие цементы, бетоны и самонапряженные конструкции: сборник трудов Международной научно-практической конференции, Брест, 18–20 декабря 2000 г. Брест: БГТУ; 2000, с. 164–170.
22. Розенталь Н.К., Любарская Г.В. Коррозия бетона при взаимодействии щелочей с диоксидом кремния заполнителя. Бетон и железобетон. 2012;(1):50–60.
23. Фаликман В.Р., Сиротин П.Н. Оценка возможности использования щебня по ГОСТ 32703 для производства бетонов общегражданского строительства. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;33(2):194–212. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-194-212](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-194-212)
24. ГОСТ 32730-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок дробленый. Технические требования. Москва: Стандартинформ; 2019.
25. ГОСТ 32824-2014. Дороги автомобильные общего пользования. Песок природный. Технические требования. Москва: Стандартинформ; 2019.
26. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019.
27. Зенин С.А., Кудяков К.Л., Кудинов О.В. Оценка влияния бетонов на заполнителях по ГОСТ 32703-2014 на прочностные и деформативные свойства изгибаемых железобетонных конструкций. Бетон и железобетон. 2022;(1):10–16. <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-10-16>
28. Макеев А.И., Чернышов Е.М. Экспериментальные исследования закономерностей влияния размерно-геометрических параметров щебня на потенциал сопротивления бетонов разрушению. Строительство и реконструкция. 2018;(2):122–132.

References

1. State Standard 13015-2012. Concrete and reinforced concrete products for construction. General technical requirements. Rules for acceptance, marking, transportation and storage. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
2. State Standard 26633-2015. Heavy-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
3. State Standard 31384-2017. Protection of concrete and reinforced concrete structures against corrosion. General technical requirements. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
4. Technical Regulations on the safety of buildings and structures: Federal Law, 30 december 2009, No. 384-FZ [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-30122009-n-384-fz-tekhnicheskii/> (In Russian).
5. State Standard 19231.0-83. Reinforced concrete slabs for tramway track pavements. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards; 1984. (In Russian).
6. State Standard 19231.1-83. Reinforced concrete slabs for tramway track pavements. Structure and dimensions. Moscow: Publishing House of Standards; 1983. (In Russian).
7. Performing research work on the analysis of domestic regulatory documents and European standards containing technical requirements and performance characteristics of concrete, rules for their manufacture and conformity assessment, to determine the possibility of direct application of European standards in the domestic construction industry. Moscow: JSC Research Center of Construction. Research and Development registration No. AAAA-A19-119070890044-9; 2019. (In Russian).
8. Report on research work evaluation of the influence of concrete on aggregates according to GOST 32703 on the adhesion of concrete and reinforcement, deformative and strength properties of reinforced concrete structures. Moscow: JSC Research Center of Construction. Research and Development registration No. 121061600046-3; 2021. (In Russian).

9. State Standard 1.5-2001. Interstate System for Standardization. Interstate standards, rules and recommendations on interstate standardization. General requirements for structure, drafting, presentation, content and indication. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. (In Russian).
10. On ensuring the uniformity of measurements: Federal Law, 26 June 2008, No. 102 [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=398044>. (In Russian).
11. SP 131.13330.2012. Building climatology. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2020. (In Russian).
12. Sharipov R.Sh., Zenin S.A., Krylov S.B., Volkov Yu.S. Evaluation of methods for calculating reinforced concrete structures for extreme fatigue conditions. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2020;27(4):148–159. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4\(27\)-148-159](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2020-4(27)-148-159)
13. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
14. Zakharov V.B. Development and research of the operability of the reinforced concrete sub-rail base structure for urban ground rail transport [dissertation]. Saint Petersburg; 2002. (In Russian).
15. Sultanov N.N. Feasibility study of promising designs of tram tracks. Dis. ... Candidate of Technical Sciences [dissertation]. Saint Petersburg; 2015. (In Russian).
16. Derevyanko V.N., Salamakha L.V., Kulachko E.A., Gopaytsa V.A. Development and research of dispersed reinforced concrete for the production of tram plates. Visnik Pridniprovs'koï derzhavnoi akademii budivnitstva ta arkhitekturi = Bulletin of Prydniprovs'ka State Academy of Civil Engineering and Architecture. 2011;(9):4–8. (In Russian).
17. Dudkin E.P., Paraskevopulo Yu.G., Sultanov N.N. The use of fibroconcrete in the construction of tram tracks. Transportnoe stroitel'stvo = Transport construction. 2012;(3-4):77–79. (In Russian).
18. State Standard 32703-2014. Automobile roads of general use. Crushed stone and gravel from rocks. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
19. State Standard 8267-93. Crushed stone and gravel of solid rocks for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
20. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
21. Pavlova I.P. On the influence of aggregates on the modulus of elasticity of concrete. In: Straining cements, concretes and self-stressed structures: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, Brest, December 18-20, 2000; Brest: BSTU; 2000, pp. 164–170. (In Russian).
22. Rosenthal N.K., Lyubarskaya G.V. Corrosion of concrete in the interaction of alkalis with silica filler. Beton i zhelezobeton = Concrete and reinforced concrete. 2012;(1):50–60. (In Russian).
23. Falikman V.R., Sirotnin P.N. Assessment of the possibility of using crushed stone according to GOST 32703 for the production of concretes of civil construction. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;33(2):194–212. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-194-212](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-194-212)
24. State Standard 32730-2014. Automobile roads of general use. Crushed sand. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
25. State Standard 32824-2014. Automobile roads of general use. Natural sand. Technical requirements. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
26. State Standard 8736-2014. Sand for construction works. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
27. Zenin S.A., Kudjakov K.L., Kudinov O.V. Assessment of the influence of concrete on aggregates according to GOST 32703-2014 on the strength and deformative properties of bent reinforced concrete structures. Beton i zhelezobeton = Concrete and reinforced concrete. 2022;(1):10–16. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0005-9889-2022-609-1-10-16>
28. Makeev A.I., Chernyshov E.M. Experimental studies of the regularities of the influence of dimensional and geometric parameters of crushed stone on the potential of concrete resistance to destruction. Stroitel'stvo i rekonstruktsiya = Building and Reconstruction. 2018;(2):122–132. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Борис Сергеевич Соколов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: moo-shell@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-80

Boris S. Sokolov, Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of Thin and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: moo-shell@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-74-80

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

e-mail: titae@bk.ru

тел.: +7 (499) 174-74-92

Vitaly A. Titaev[✉], Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher of Laboratory of Thin and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Associate Professor of Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: titae@bk.ru

tel.: +7 (499) 174-74-00

Иван Александрович Черный, инженер лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», студент Института промышленного и гражданского строительства НИУ МГСУ, Москва

e-mail: kron_975@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-00

Ivan A. Cherny, Engineer of Laboratory of Thin and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Student of Institute of Industrial and Civil Engineering, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: kron_975@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-74-50

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.32; 691.328

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-125-135](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-125-135)

EDN: WPILQP

МОНИТОРИНГ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ США И РФ В ОБЛАСТИ ТРЕБОВАНИЙ К БЕТОНУ И ЖЕЛЕЗОБЕТОНУ

В.Ф. СТЕПАНОВА¹, д-р техн. наук

А.В. БУЧКИН¹, канд. техн. наук

К.Л. КУДЯКОВ^{1,2,✉}, канд. техн. наук

С.К. ХЛЕБНИКОВ^{1,2}

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

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

Аннотация

Введение. Одной из актуальных задач развития технического регулирования в строительстве, поставленных Правительством Российской Федерации и решаемых Минстроем России, является восстановление системы мониторинга нормативной базы в строительстве в целях ее своевременного обновления, устранения возникающих дублирований и противоречий. Между тем появление новых строительных материалов, технологий и методов проектирования приводит к необходимости постоянного совершенствования нормативной базы и повышения уровня гармонизации российских и международных норм и стандартов в области строительства зданий и сооружений. В настоящей статье отражены результаты выполненных работ по мониторингу российских и североамериканских нормативно-технических документов, устанавливающих требования к бетону, железобетону и изделиям из железобетона.

Цель работы: проведение сравнительного анализа нормативно-технических документов России и США в области строительства и подготовить предложения по их гармонизации.

Материалы и методы. В процессе работы были выполнены обзор, систематизация и анализ отечественных и зарубежных нормативно-технических документов в области нормирования требований к бетону и железобетону, а также научно-исследовательских работ и литературных источников, касающихся вопросов технического регулирования в данной области.

Результаты. Сформулированы предложения по разработке новых сводов правил и государственных стандартов. Предложен перечень научно-исследовательских работ, необходимых для получения предпосылок для разработки новых, корректировки и актуализации ранее утвержденных нормативно-технических документов. Отмечены существенные различия в системах технического регулирования США и РФ, а также низкая степень гармонизации нормативных требований.

Выводы. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности последующих работ по мониторингу отечественной и зарубежной нормативно-технической документации с более детальной декомпозицией областей исследования и конкретизацией узких направлений для углубленного анализа. Разработанные в рамках выполненных работ по мониторингу предложения применимы для развития отечественной научной и нормативной базы.

Ключевые слова: мониторинг, анализ, стандарты, своды правил, бетон, железобетон, корректировка требований

Для цитирования: Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Хлебников С.К. Мониторинг нормативных документов США и РФ в области требований к бетону и железобетону. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):125–135. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-125-135](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-125-135)

Вклад авторов

Степанова В.Ф. – общее руководство работой, подготовка выводов, подготовка текста статьи.

Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Хлебников С.К. – анализ, обзор и систематизация литературных источников и результатов ранее выполненных исследований.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликтов интересов.

Поступила в редакцию 23.03.2023

Поступила после рецензирования 05.04.2023

Принята к публикации 11.04.2023

MONITORING OF STANDARD DOCUMENTS OF THE USA AND RUSSIAN FEDERATION IN TERMS OF REQUIREMENTS FOR CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE

V.F. STEPANOVA¹, Dr. Sci. (Engineering)

A.V. BUCHKIN¹, Cand. Sci. (Engineering)

K.L. KUDYAKOV^{1,2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

S.K. KHEBNIKOV^{1,2}

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

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

Abstract

Introduction. One of the urgent tasks for the development of technical regulation on construction, set by the Government of the Russian Federation and addressed to the Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia, is to restore the monitoring system in construction for its timely updating, eliminating duplications and contradictions that arise. Meanwhile, new building materials, technologies and design methods demand continuous improvement of the standard framework and increase in the harmonization of Russian and international standards and regulations in the construction of buildings and structures. The paper presents the monitoring results of Russian and North American standard technical documentation setting requirements for concrete, reinforced concrete and reinforced concrete products.

Aim. To conduct a comparative analysis of standard technical documentation in construction industry of Russia and the United States and prepare suggestions for their harmonization.

Materials and methods. The study involved a review, systematization and analysis of national and foreign technical documents in the field of standardization of requirements for concrete and reinforced concrete, as well as research projects and bibliography concerning technical regulation in this field.

Results. The authors produced suggestions for the development of new codes of practice and state standards. The present paper introduced a list of research which can be used as prerequisites for developing new, as well

as adjusting and updating previously approved technical standards. The authors noted significant differences between technical regulation systems in the USA and Russian Federation, as well as poor harmonization of standards requirements.

Conclusion. The results obtained indicate the feasibility of subsequent monitoring of national and foreign standard technical documentation with domain decomposition and specification of areas for in-depth analysis. The suggestions made as part of the monitoring work can contribute to the development of the national scientific and standard framework.

Keywords: monitoring, analysis, standards, codes of practice, concrete, reinforced concrete, adjustment of requirements

For citation: Stepanova V.F., Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Khlebnikov S.K. Monitoring of standard documents of the USA and Russian Federation in terms of requirements for concrete and reinforced concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):125–135. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-125-135](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-125-135)

Author contribution statements

Stepanova V.F. – general management, drawing conclusions, text preparation.

Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Khlebnikov S.K. – review, analysis and systematization of literature and results of previously conducted studies.

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 authors declare no conflict of interest.

Received 23.03.2023

Revised 05.04.2023

Accepted 11.04.2023

Введение

Целью исследования являлся анализ российских и североамериканских нормативно-технических документов (НТД), устанавливающих требования к бетону, железобетону и изделиям из железобетона (ЖБИ), и подготовка предложений по их гармонизации и развитию отечественной нормативной базы. Учитывая, что на данную работу было отведено 150 дней (включая бюрократические проволочки и отчетность), что является недостаточным сроком для выполнения работ такого масштаба, то результаты настоящей работы следует считать рекогносцировочными. Научно-исследовательские работы по мониторингу отечественной и зарубежной НТД следует продолжить с учетом более детальной декомпозиции областей исследования и конкретизацией узких направлений для углубленного анализа с обеспечением свободного доступа к зарубежной НТД и ее переводу.

Содержание работы

В процессе работы над статьей выполнен анализ более 200 отечественных и зарубежных документов в сфере строительства, включая модельные кодексы ICC, руководства ACI и стандарты ASTM, устанавливающие требования к бетону, железобетону и ЖБИ.

Наиболее детально рассмотрен Международный архитектурно-строительный кодекс (International Building Code – IBC) [1]. Нормы IBC включают в себя общие принципы и требования к зданиям и сооружениям, включая их классификацию, к объемно-планировочным решениям, внутренней отделке, устройству фундаментов, стен и покрытий зданий, к системам противопожарной безопасности, лифтам и эскалаторам, к аварийным выходам, доступности создаваемой среды для инвалидов и т. д. Нормы IBC в своих разделах ссылаются на реферированные стандарты других широко известных организаций – разработчиков норм, как, например, ASTM и ANSI, а также на стандарты отраслевых объединений, рекомендованные для применения при проектировании конструкций из конкретных материалов. IBC обновляется (установлен трехгодичный срок пересмотра) благодаря обзору предлагаемых изменений, представленных должностными лицами, обеспечивающими соблюдение кодекса, представителями промышленности, специалистами по проектированию и другими заинтересованными сторонами. Предлагаемые изменения тщательно рассматривают в рамках открытого процесса разработки.

Выполненный сравнительный анализ показал, что прямых аналогов система технического регулирования в виде модельных кодексов ICC в отечественной НТД не имеет. Данные системы технического регулирования (РФ и США) имеют принципиальные отличия. Наиболее приближена к ней система Федеральных законов и кодексов Российской Федерации, устанавливающих требования к параметрам зданий и сооружений и к соответствующим им процессам:

- № 190-ФЗ «Градостроительный кодекс Российской Федерации» (с изменениями на 1 мая 2022 года) [2];
- № 184-ФЗ «О техническом регулировании» (с изменениями на 2 июля 2021 года) [3];
- № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (с изменениями на 2 июля 2013 года) [4];
- № 123-ФЗ «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» (с изменениями на 30 апреля 2021 года) [5] и др.

На основании выполненного мониторинга необходимо отметить низкий уровень гармонизации большинства нормативных документов США (ICC, ACI, ASTM) и РФ. Для дальнейшей работы по гармонизации отечественных и зарубежных стандартов необходимо детальное рассмотрение модельных кодексов США (включая проекты новых документов) и НТД РФ. Для выявления положений, применимых для заимствования в целях развития и гармонизации отечественной системы технического регулирования и модельных кодексов ICC, требуются дополнительные работы в рамках последующих мониторингов, направленных на детальное рассмотрение каждого из них.

В соответствии с Постановлением Правительства РФ № 914 от 20.05.2022 г. [6] внесены изменения в Постановление № 815 от 28.05.2021 г. [7] и актуализирован перечень норм (далее – Перечень), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» (далее – № 384-ФЗ) [4]. В новой редакции Перечня существенно снижено количество требований, обязательных к исполнению (большинство документов и стандартов исключены). Применительно к бетону, железобетону или ЖБИ обязательными остались требования, приведенные в следующих нормативных документах:

- ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» [8];
- СП 20.13330.2016 «СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия» [9];
- СП 28.13330.2017 «СНиП 2.03.11-85 Защита строительных конструкций от коррозии» [10].

Необходимо отметить, что, в соответствии с действующим законодательством, одновременно с нормами обязательного применения должны использоваться нормативные документы так называемого добровольного применения, использование которых также позволяет обеспечить соблюдение требований № 384-ФЗ [4]. Перечень нормативных документов добровольного применения утвержден приказом Росстандарта от 02.04.2020 № 687 (с изменениями на 20.04.2021) [11]. Данный перечень включает в себя 673 документа (включая новые и старые редакции) в составе:

- 128 документов ранга межгосударственный стандарт (ГОСТ);
- 71 документ ранга национальный стандарт (ГОСТ Р);
- 130 сводов правил в виде актуализированных редакций СНиП;
- 5 сводов правил в виде не актуализированных редакций СНиП;
- 3 свода правил в виде не актуализированных редакций сводов правил Госстроя России;
- 336 других сводов правил.

Как показал анализ, в перечне норм добровольного применения указаны также и нормы обязательного применения. Это можно объяснить тем, что Перечень норм обязательного применения содержит ссылки не на весь нормативный документ, а только на отдельные его пункты.

Из Разъяснения Минстроя [12] следует, что добровольность применения стандартов и сводов правил, включенных в [6], не означает, что они могут не соблюдаться. Добровольность применения предоставляет возможность использования проектировщиками других правил, не противоречащих требованиям Федерального закона № 384-ФЗ от 30.12.2009 [4]. При этом согласно части 6 статьи 15 Федерального закона № 384-ФЗ от 30.12.2009 [4] соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения требованиям безопасности, а также проектируемые мероприятия по обеспечению его безопасности должны быть обоснованы одним или несколькими из следующих способов:

- результаты исследований;
- расчеты и (или) испытания, выполненные по сертифицированным или апробированным иным способом методикам;
- моделирование сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;
- оценка риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.

В процессе анализа НТД РФ сформулированы предложения по внесению изменений в ряд действующих документов и по актуализации ранее утвержденных сводов правил. Также даны предложения по разработке новых сводов правил Минстроя России, которые частично приведены в табл. 1.

С учетом перевода большинства НТД в разряд добровольного применения (Постановление № 914 от 20.05.2022 г. [6]) необходимо утвердить общепринятые порядок и правила

Таблица 1

Некоторые предложения по разработке новых сводов правил и стандартов

Table 1

Suggestions for the development of new codes and standards

Наименование документов	Примечание
СП «Проектирование бетонных и железобетонных конструкций с учетом жизненного цикла зданий и сооружений и среды их эксплуатации»	На данный момент отсутствует единый документ, устанавливающий требования к проектированию бетонных и железобетонных конструкций с учетом жизненного цикла зданий и сооружений и среды их эксплуатации, в т. ч. регламентирующий правила проектирования на конкретный срок службы конструкций; методы оценки коррозионного состояния эксплуатирувавшихся железобетонных конструкций, их остаточной несущей способности, эксплуатационной пригодности и ожидаемого срока службы в заданных агрессивных условиях; методы определения нормативных сроков службы железобетонных конструкций. Требуется разработка свода правил на основе документов «Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл» (Москва, 2019) [13], ACI 365.1R-17 [14]
СП «Типовые конструктивные системы зданий. Основные положения»	Требуется разработка документа, устанавливающего правила проектирования типовых конструктивных систем зданий и сооружений, а также порядок пересмотра ранее разработанных типовых узлов, конструкций и проектов
ГОСТ «Неметаллическая фибра для дисперсного армирования тяжелых и мелкозернистых бетонов»	На данный момент требования к неметаллической фибре устанавливают в рамках различных ВСН, СТО, ТУ. Единые требования к неметаллической фибре отсутствуют
СП «Защита металлических конструкций от коррозии»	Рекомендуется выделить части СП 28.13330.2017 [10] по вопросам защиты металлических конструкций в отдельный документ в силу специфики таких конструкций и с целью гармонизации отечественных и зарубежных норм
ГОСТ «Рециклинговый щебень для общестроительных бетонов»	На данный момент отсутствуют нормативные документы, определяющие нормируемые показатели качества рециклингового щебня и отсева (песка) для их масштабного использования при производстве тяжелых бетонов классов В7,5–В30. Кроме этого, не изучены основные физико-механические и эксплуатационные характеристики бетонов на основе рециклингового щебня и отсева (песка). Таким образом, для определения областей применения рециклингового щебня и отсева (песка), а также тяжелых бетонов классов В7,5–В30 требуется разработка нового документа с учетом ГОСТ 32495–2013 [15] и зарубежных НТД
ГОСТ «Геосинтетические цементные композитные маты. Технические условия»	На данный момент единые требования к геосинтетическим цементным композитным матам отсутствуют. Требуется разработка документа, регламентирующего основные потребительские свойства материала и методы испытания по их определению на основе положений ASTM D8364/D8364M [16], ASTM D8329 [17], ASTM D8030/D8030M [18], ASTM D8058 [19]
ГОСТ «Геосинтетические цементные композитные маты. Методы испытаний»	

выполнения обосновывающих исследований, расчетных обоснований, результаты которых могут быть убедительными для строительной инспекции, экспертизы, проектировщиков, а также рассмотреть возможность и порядок последующего включения их результатов и методов в СП и ГОСТ.

Считаем целесообразным и необходимым выполнить актуализацию документов, содержащих методики учета норм и расценок на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы с учетом современных технологий и материалов.

Для реализации предложений по разработке новых, корректировке и актуализации ранее утвержденных НТД целесообразно выполнить следующие НИР и НИОКР:

- Оценка применимости современных инженерных и численных методов моделирования коррозионных повреждений железобетона и расчетной оценки долговечности железобетонных конструкций с учетом проектирования бетонных и железобетонных конструкций по предельным состояниям по долговечности и выносливости.
- Проведение исследований и составление предложений для внесения в НТД, учитывающих проектирование бетонных и железобетонных конструкций по предельному состоянию по ремонтпригодности (восстанавливаемости).
- Оценка эффективности использования новых видов фибры (синтетической и минеральной) в технологии изготовления асбестоцементных изделий.
- Оценка морозостойкости и водонепроницаемости высокопрочных бетонов на основе малоэнергоемких, низкоуглеродных многокомпонентных смешанных вяжущих с использованием тонкодисперсного карбоната кальция и метакрилатов.
- Исследование функциональных характеристик и методов испытаний бетонных смесей и бетонов на основе серпентинитов для сухой защиты атомных реакторов.
- Разработка метода определения реакционной способности песка по определению содержания растворимого кремнезема и деформаций расширения и совершенствование метода определения реакционной способности с целью подготовки предложений для изменения ГОСТ 8269.0-97 [20].
- Оценка целесообразности включения дифференцированных требований к заполнителям в зависимости от среды эксплуатации бетона (по примеру ASTM C33 [21]).
- Выполнить работы по детальному анализу наиболее перспективных в вопросах риск-ориентированного подхода зарубежных стандартов США и системы ISO, JCSS в части возможности применения методик и подходов по выполнению вероятностных расчетов в нашей стране с учетом требований отечественной нормативной базы.
- Разработка положений и детализация теоретических и практических рекомендаций в развитие СП 70.13330.2012 [22] в вопросах расчета и проектирования основных типов состава бетона (тяжелого, особо тяжелого, мелкозернистого, легкого, ячеистого) конструкций для повышения качества выполняемых проектных и строительных работ, сокращения сроков и снижения стоимости проектирования за счет использования рекомендованных методик расчета и прямых подборов с целью гармонизации с зарубежными нормами.
- Разработка положений и детализация теоретических и практических рекомендаций в развитие СП 70.13330.2012 [22] в вопросах технологии бетонных работ в условиях жаркого и холодного климатов при производстве массивных конструкций и пр. с целью гармонизации с зарубежными нормами.
- Исследовать свойства различных золошлаковых отходов, генерируемых на территории РФ, разработать предложения по их учету и систематизации, а также по их применению в качестве строительных материалов и материалов для дорожного строительства.
- Исследовать коррозионную стойкость металлической арматуры в бетонах, содержащих золошлаковые отходы, с учетом их минерального и химического составов.
- Исследовать деформативность и долговечность бетонов, содержащих золошлаковые отходы, с учетом их минерального и химического составов.
- Мониторинг и анализ научно-технической документации по применению рециклингового щебня и отсева (продуктов утилизации бетонных и железобетонных конструкций)

в качестве заполнителей для производства бетонных и железобетонных конструкций общестроительного назначения.

– Выполнить сравнительный анализ (ТЕР, ФЕР, ЕНиР и пр.), актуализацию и дополнение отечественных методик учета норм и расценок на строительные, монтажные и ремонтно-строительные работы с учетом современных технологий и материалов.

Выводы

1. В настоящей статье частично отражены результаты работ по мониторингу отечественной и зарубежной НТД, выполненных в 2022 г. в лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» по заказу ФАУ «ФЦС» Минстроя России.

2. Сформулированы предложения по разработке новых сводов правил и государственных стандартов, а также предложен перечень НИР и НИОКР, необходимых для получения предпосылок для разработки новых, корректировки и актуализации ранее утвержденных НТД. Отмечены существенные различия в системах технического регулирования США и РФ, а также низкая степень гармонизации НТД. Рассмотрены некоторые изменения в отечественной НТД. Разработанные в рамках выполненных работ по мониторингу предложения применимы для развития отечественной нормативной базы.

3. Полученные результаты свидетельствуют о целесообразности последующих работ по мониторингу отечественной и зарубежной НТД с более детальной декомпозицией областей исследования и конкретизацией узких направлений для углубленного анализа.

4. Рационально на государственном уровне организовать систематический мониторинг НТД с целью своевременного выявления новых положений вновь разрабатываемых стандартов и корректировки действующих нормативных документов. Также необходимо отметить, что отведенное договором время на выполнение анализа и мониторинга (150 дней) является недостаточным для работы данного масштаба. При этом свободный доступ к зарубежной НТД затруднен.

5. Для качественного и полного выполнения работ по мониторингу целесообразно создать специальные подразделения с подготовленными кадрами в крупных научно-исследовательских центрах и университетах, занимающихся исключительно проблемами нормирования. Экономический эффект от разработки качественных норм выявить трудно, однако в объемах РФ он представляется весьма значительным и будет проявляться в повышении безопасности конструкций, зданий и сооружений, сокращении расходов на текущий и капитальный ремонт, улучшении среды обитания населения. Также является целесообразным создание доступной для специалистов базы данных, имеющей доступ к актуальной зарубежной НТД и содержащей ее переводы.

Список литературы

1. International Building Code (IBC 2021) [internet]. Available at: <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2021P2> (accessed: 02.06.2022).
2. Градостроительный кодекс Российской Федерации: 29 дек. 2004 г., № 190-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=443205>
3. О техническом регулировании: Федеральный закон, 27 дек. 2002 г., № 184-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=410948>
4. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений (с изменениями на 2 июля 2013 года): Федеральный закон, 30 дек. 2009 г., № 384-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-30122009-n-384-fz-tekhnicheskii/>
5. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности: Федеральный закон, 22 июля 2008 г., № 123-ФЗ [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219>
6. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. N 815: постановление Правительства РФ, 20 мая 2022 г., № 914 [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=423123>
7. Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», и о признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 г. № 985: постановление Правительства РФ, 28 мая 2021 г., № 815 [интернет]. Режим доступа: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=431978>
8. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2015.
9. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Москва: Стандартинформ; 2018.
10. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. Москва: Минстрой России; 2017.
11. Об утверждении перечня документов в области стандартизации, в результате применения которых на добровольной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона от 30 декабря 2009 г. №384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений: приказ Росстандарта, 02 апр. 2020, № 687 (с изменениями на 20.04.2021) [интернет]. Режим доступа: <https://geopriz.ru/wp-content/uploads/Prikaz-Rosstandarta-567-OT-20.04.2021.pdf>
12. О разъяснении особенностей обязательного и добровольного применения документов, включенных в доказательную базу технического регламента № 384-ФЗ от 30.12.2009: письмо Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 23 окт. 2019 г., № 40060-АС/08 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/563636204>
13. Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл [интернет]. Москва; 2019. Режим доступа: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp23_2019.pdf
14. ACI 365.1R-17. Report on Service Life Prediction [internet]. Available at: https://www.academia.edu/72428286/_1r_17_report_on_service_life_prediction
15. ГОСТ 32495-2013. Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2014.
16. ASTM D8364/D8364M-21. Standard Specification for Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Materials [internet]. Available at: https://www.astm.org/d8364_d8364m-21.html
17. ASTM D8329-21. Standard Test Method for Determination of Water/Cementitious Materials Ratio for Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCMs) and Measurement of the Compression Strength of the Cementitious Material Contained Within [internet]. Available at: <https://www.astm.org/d8329-21.html>
18. ASTM D8030/D8030M-16. Standard Practice for Sample Preparation for GCCM [internet]. Available at: https://www.astm.org/d8030_d8030m-16.html
19. ASTM D8058-19. Standard Test Method for Determining the Flexural Strength of a Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Using the Three-Point Bending Test [internet]. Available at: <https://www.astm.org/d8058-19.html>

20. ГОСТ 8269.0-97. Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. Москва: Стандартинформ; 2018.
21. ASTM C33-07. Standard Specification for Concrete Aggregates [internet]. Available at: <https://www.astm.org/c0033-07.html>
22. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87. Москва: Минрегион России; 2012.

References

1. International Building Code (IBC 2021) [internet]. Available at: <https://codes.iccsafe.org/content/IBC2021P2> (accessed: 02.06.2022).
2. Urban Planning Code of the Russian Federation: 29 december 2004, No. 190-FZ [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=443205> (In Russian).
3. On Technical Regulation: Federal Law, 27 december 2002 r., No. 184-FZ [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=410948> (In Russian).
4. Technical Regulations on the safety of buildings and structures" [as amended on July 2, 2013]: Federal Law, 30 december 2009, No. 384-FZ [internet]. Available at: <https://legalacts.ru/doc/federalnyi-zakon-ot-30122009-n-384-fz-tekhnicheskii/> (In Russian).
5. Technical Regulations on Fire safety requirements: Federal Law, 22 July 2008, No. 123-FZ [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=444219> (In Russian).
6. On Amendments to the Resolution of the Government of the Russian Federation of May 28, 2021 No. 815: Resolution of the Government of the Russian Federation of May 20, 2022 No. 914 [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=423123> (In Russian).
7. On Approval of the List of National Standards and Codes of Rules (Parts of Such Standards and Codes of Rules), as a Result of Which Compliance with the Requirements of the Federal Law "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" is Mandatory, and on Invalidation of the Decree of the Government of the Russian Federation Federation of July 4, 2020 No. 985: Decree of the Government of the Russian Federation No. 815 dated May 28, 2021 [internet]. Available at: <https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=431978> (In Russian).
8. State Standard 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
9. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85*. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
10. SP 28.13330.2017. Protection against corrosion of construction. Updated version of SNiP 2.03.11-85. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
11. On Approval of the list of documents in the field of standardization, as a Result of which Compliance with the Requirements of Federal Law No. 384-FZ dated December 30, 2009 "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" is ensured on a voluntary Basis: Rosstandart Order No. 687 dated 02.04.2020 (as amended on 20.04.2021) [internet]. Available at: <https://geopriz.ru/wp-content/uploads/Prikaz-Rosstandarta-567-OT-20.04.2021.pdf> (In Russian).
12. On explaining the features of mandatory and voluntary application of documents included in the evidence base of technical Regulations No. 384-FZ dated 12/30/2009: Letter of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation No. 40060-AC/08 dated 10/23/2019 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/563636204> (In Russian).
13. Methodological guide for the purpose of the service life of concrete and reinforced concrete structures, taking into account the impact operating environments for their life cycle [internet]. Moscow; 2019. Available at: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp23_2019.pdf (In Russian).
14. ACI 365.1R-17. Report on Service Life Prediction [internet]. Available at: https://www.academia.edu/72428286/_1r_17_report_on_service_life_prediction
15. State Standard 32495-2013. Aggregates, fines and its mixtures made from recycled reinforced and non-reinforced concrete. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
16. ASTM D8364/D8364M-21. Standard Specification for Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Materials [internet]. Available at: https://www.astm.org/d8364_d8364m-21.html

17. ASTM D8329-21. Standard Test Method for Determination of Water/Cementitious Materials Ratio for Geosynthetic Cementitious Composite Mats (GCCMs) and Measurement of the Compression Strength of the Cementitious Material Contained Within [internet]. Available at: <https://www.astm.org/d8329-21.html>
18. ASTM D8030/D8030M-16. Standard Practice for Sample Preparation for GCCM [internet]. Available at: https://www.astm.org/d8030_d8030m-16.html
19. ASTM D8058-19. Standard Test Method for Determining the Flexural Strength of a Geosynthetic Cementitious Composite Mat (GCCM) Using the Three-Point Bending Test [internet]. Available at: <https://www.astm.org/d8058-19.html>
20. State Standard 8269.0-97. Mountainous rock road-metal and gravel, industrial waste products for construction works methods of physical and mechanical tests. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
21. ASTM C33-07. Standard Specification for Concrete Aggregates [internet]. Available at: <https://www.astm.org/c0033-07.html>
22. SP 70.13330.2012. Load-bearing and separating constructions. Updated version of SNiP 3.03.01-87. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2012. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Валентина Федоровна Степанова, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Valentina F. Stepanova, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Head of Laboratory of Corrosion and Durability, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Андрей Викторович Бучкин, канд. техн. наук, заместитель заведующего лабораторией коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Andrey V. Buchkin, Cand. Sci. (Engineering), Deputy Head of Laboratory of Corrosion and Durability, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Константин Львович Кудяков[✉], канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, Москва
e-mail: konst_k@mail.ru

Konstantin L. Kudyakov[✉], Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of Laboratory of Corrosion and Durability, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: konst_k@mail.ru

Сергей Константинович Хлебников, инженер лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», студент НИУ МГСУ, Москва
Sergey K. Khlebnikov, Engineer, Laboratory of Corrosion and Durability, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, student of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 69.05.04

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-136-150](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-136-150)

EDN: YDILFM

ОПТИМИЗАЦИЯ АРМИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ ПРИ АВТОМАТИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

А.А. КВАСНИКОВ, канд. техн. наук

Е.В. СУМАРКОВ✉

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. Армирование – один из важнейших процессов при проектировании железобетонных конструкций. Необходимость оптимизации процесса армирования возникает из-за постоянного увеличения объемов и сложности строительных проектов, а также в свете требований экономичности и эффективности. В связи с этим автоматизация процессов проектирования становится все более актуальной, позволяя существенно ускорить и улучшить качество выполнения этих работ. Автоматизировать процесс проектирования пытаются и в других областях гражданского и промышленного строительства, чтобы обеспечить уменьшение издержек при строительстве и производстве работ. Обычно применяют методы Mixed Integer Programming (MIP), Симплекс-метод и Генетический алгоритм (ГА).

Цель: разработать алгоритм оптимизации процесса армирования железобетонных конструкций зданий и сооружений и создать программу для автоматизации процесса.

Материалы и методы. В работе использовались результаты расчета, выполненные авторами и полученные в программе Lira. Также авторами была создана цифровая информационная модель здания, построенная в программе Revit. Для тестовой обработки результатов использовался язык программирования python. Готовое решение выполнялось на языке C# с использованием RevitAPI.

Результаты. В работе обоснована необходимость и продемонстрирована возможность оптимизации технологических решений при проектировании зданий и сооружений из железобетона по критерию «надежность – эффективность». Для этого проведена интеграция существующих программных средств проектирования в единый модуль моделирования и проектирования и предложено к разработке необходимое программное обеспечение. Генетический алгоритм выбран основным методом для оптимизации армирования конструкций. Разработаны инструменты по обработке результатов расчета, созданию дубликата расчетной модели в среде проектирования и инструменты для анализа расчета.

Выводы. Выбранный генетический алгоритм оптимизации позволяет ускорить процесс проектирования, экономить время при проектировании железобетонных конструкций. Результаты исследования позволяют разработать программное обеспечение по автоматизации армирования.

Ключевые слова: проектирование, железобетон, снижение расхода материалов, устойчивое развитие, армирование, оптимизация, моделирование, автоматизация, расчеты, генетические алгоритмы, ТИМ

Для цитирования: Квасников А.А., Сумарков Е.В. Оптимизация армирования железобетонных конструкций зданий и сооружений при автоматизации процессов проектирования. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):136–150. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-136-150](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-136-150)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело финансовой поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.12.2022

Поступила после рецензирования 21.02.2023

Принята к публикации 07.03.2023

OPTIMIZING THE REINFORCEMENT OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN AUTOMATIC DESIGN PROCESSES

A.A. KVASNIKOV, Cand. Sci. (Engineering)

E.V. SUMAROKOV✉

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

Abstract

Introduction. Reinforcement is one of the most important processes in designing reinforced concrete structures. The need to optimize the reinforcement process arises from the constant increase in the volume and complexity of construction projects, as well as from the economy and efficiency requirements. In this regard, automatic design processes are becoming increasingly relevant, being conducive to significant acceleration and improvement of the quality of these works. Other areas of civil and industrial construction are also adopting automatic design processes in order to reduce construction and production costs. Mixed Integer Programming (MIP), Simplex Method (SM), and Genetic Algorithm (GA) are commonly used.

Aim: to develop an algorithm for optimizing the reinforcement process of reinforced concrete structures of buildings and structures and to design a program for automating the process.

Materials and methods. The paper relies upon the results of the calculations performed by the authors in the Lira program. Furthermore, the authors created a digital information model of the building in the Revit program. The Python programming language was used to test the results. A ready-made solution was created in C# using RevitAPI.

Results. The paper substantiates the relevance and demonstrates the feasibility of optimization of technological solutions in the process of designing buildings and structures made of reinforced concrete according to the criterion "reliability – efficiency". To this end, existing design software was integrated into a single modeling and design module, and the necessary software was proposed for development. The genetic algorithm was chosen as the main method for optimizing the reinforcement of structures. Tools for processing the calculation results, creating a duplicate of the calculation model in the design environment and analyzing the calculations were elaborated.

Conclusion. The selected genetic algorithm accelerates the design process, and saves time when designing reinforced concrete structures. The results of the study are instrumental in developing the software for the automation of reinforcement.

Keywords: design, reinforced concrete, reduced materials consumption, sustainable development, reinforcement, optimization, modeling, automation, calculations, genetic algorithms, BIM

For citation: Kvasnikov A.A., Sumarokov E.V. Optimizing the reinforcement of buildings and structures in automatic design processes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):136–150. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-136-150](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-136-150)

Author contribution statements

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 13.12.2022

Revised 21.02.2023

Accepted 07.03.2023

Актуальность темы, реальность и осознанность проблематики

Армирование железобетонных конструкций – комплексная задача. Количество информации, которое необходимо учитывать при проектировании, серьезно усложняет данную задачу. В процессе выпуска документации проектировщик сталкивается с огромным количеством проблем и старается принять оптимальное решение, но, как правило, оценить эффективность этого решения – непосильная задача для всех участников проектирования. Решение по армированию железобетонных конструкций ведется на основании их расчета в специализированном программном обеспечении, на основании сводов правил и личного опыте проектировщика. Как правило, заказчик сталкивается уже с конечным результатом и не может корректно оценить другие возможные результаты армирования. Таким образом, у подрядчика есть только одно решение и нет возможности оценить оптимальность данного решения.

Вероятно, есть решения задач проекта, которые лучше принятых, но из-за сжатых сроков проектирования они никогда не будут найдены. Чтобы улучшить решение этой проблемы, необходима возможность создания нескольких вариантов армирования конструкций для выбора проектировщиком или заказчиком для получения более оптимального результата. Основная идея состоит в том, чтобы находить все возможные оптимальные решения и предлагать их на выбор или же по заранее установленным ограничениям сразу принимать оптимальный результат, который необходим проектировщику для уменьшения трудозатрат при проектировании.

Автоматизация процесса проектирования используется и в других областях гражданского строительства, чтобы обеспечить уменьшение издержек при проектировании. Обычно используются методы Mixed Integer Programming (MIP), симплекс-метод и генетический алгоритм (ГА) [1].

Еще одна сложность состоит в том, что оптимальное решение сложно определить. Такие параметры, как количество допустимых различных типов арматуры, порядок строительства и другие данные, связанные с производством работ, варьируются в зависимости от проекта и подрядчика. Эту несколько произвольную задачу нужно решать, моделируя процесс принятия решений человеком [2].

Процесс проектирования железобетонных конструкций заключается в следующих этапах:

- концептуальное проектирование;
- стадия проект;
- разработка рабочей документации.

На каждом этапе происходит итерационная разработка документации с увеличением дополнительной информации о конструкциях на каждой итерации.

Подходы для автоматизации процесса проектирования основаны на получении готовых результатов армирования из расчетного комплекса с последующим получением оптимального решения на их основе.

Проектирование железобетонных конструкций – это процесс, состоящий из нескольких этапов. На начальном этапе у нас есть приблизительное понимание того, как будет выглядеть раскладка арматуры. Сделать выводы проектировщик может на основе визуального представления числовых значений арматуры.

Выбор размещения требуемых стержней арматуры выбирается исходя из опыта и на основе требуемых значений по расчету (рис. 1). Это очень трудоемкий процесс, поэтому, как правило, выполняется только один вариант раскладки арматуры.

После раскладки арматуры выполняются чертежи и оформляется документация [3–5] (рис. 2, 3).

Расчет армирования производится в расчетных комплексах. Арматура раскладывается таким образом, что необходимое количество арматуры на любом участке плиты равно количеству, требуемому армированию по расчету. Требуемое армирование обозначается $A_{s, req}$ и изменяется по конструкции в зависимости от распределения усилий в конструкции.

Арматуру, которую необходимо укладывать в плиту, подбирают исходя из формулы (1), в которой вычисляется площадь поперечного сечения стержней, укладываемых на метр длины конструкции.

$$A_s = \frac{\pi \sigma^2}{4c} \quad (1)$$

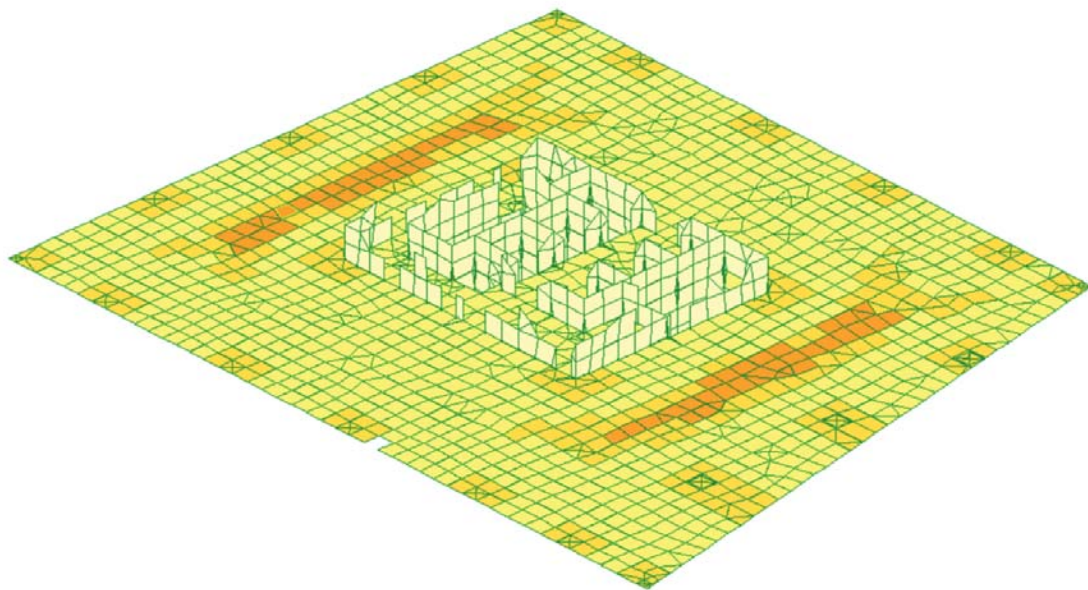
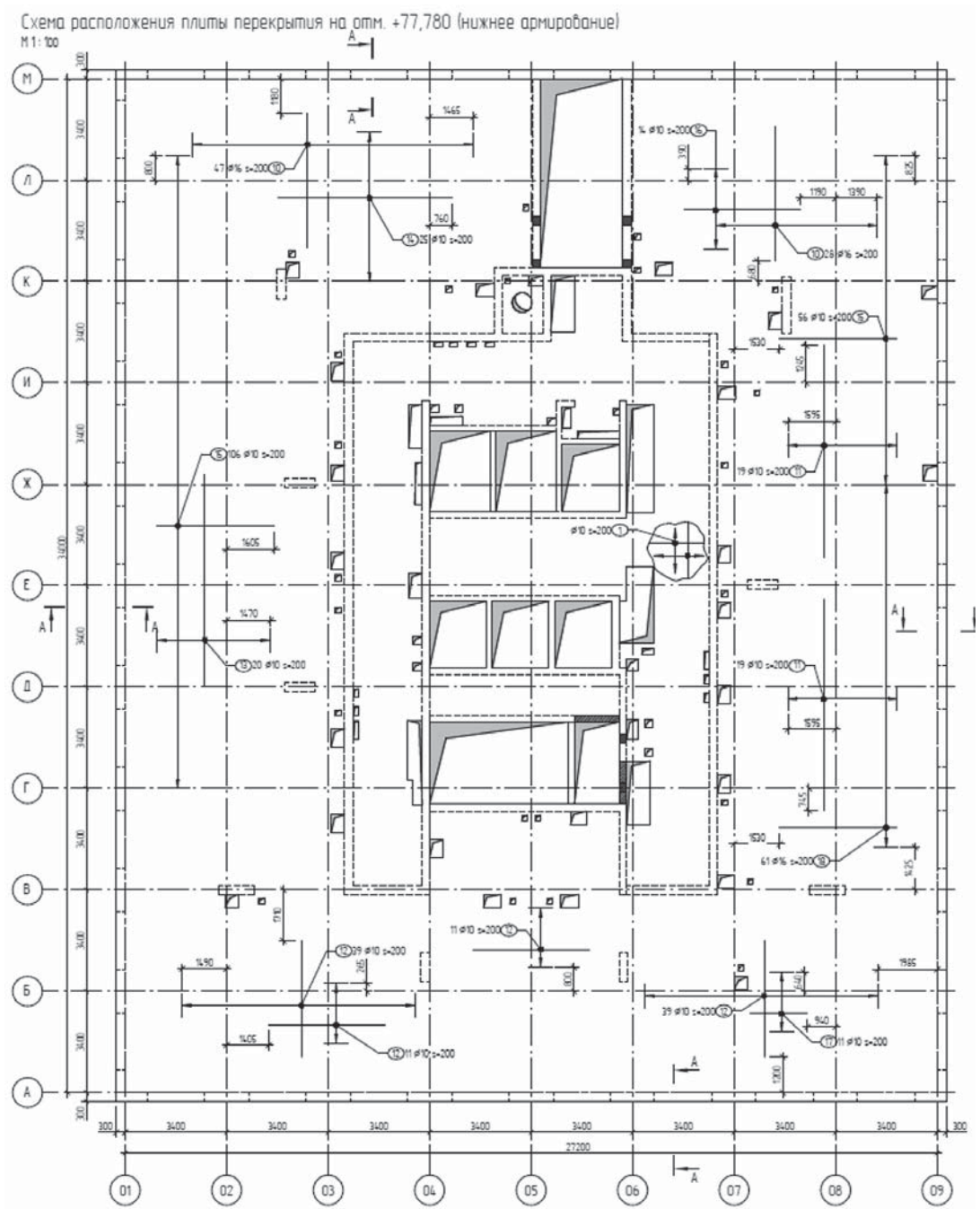
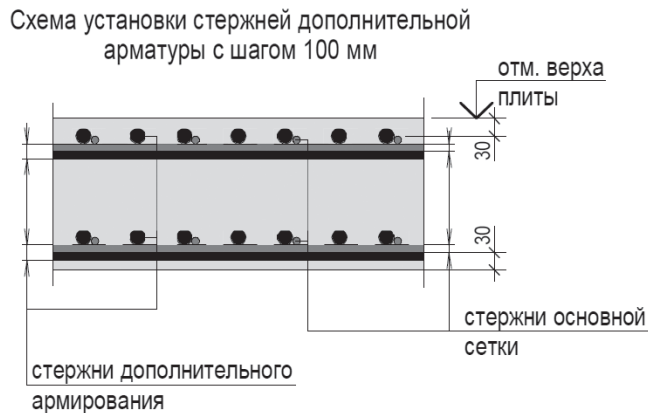
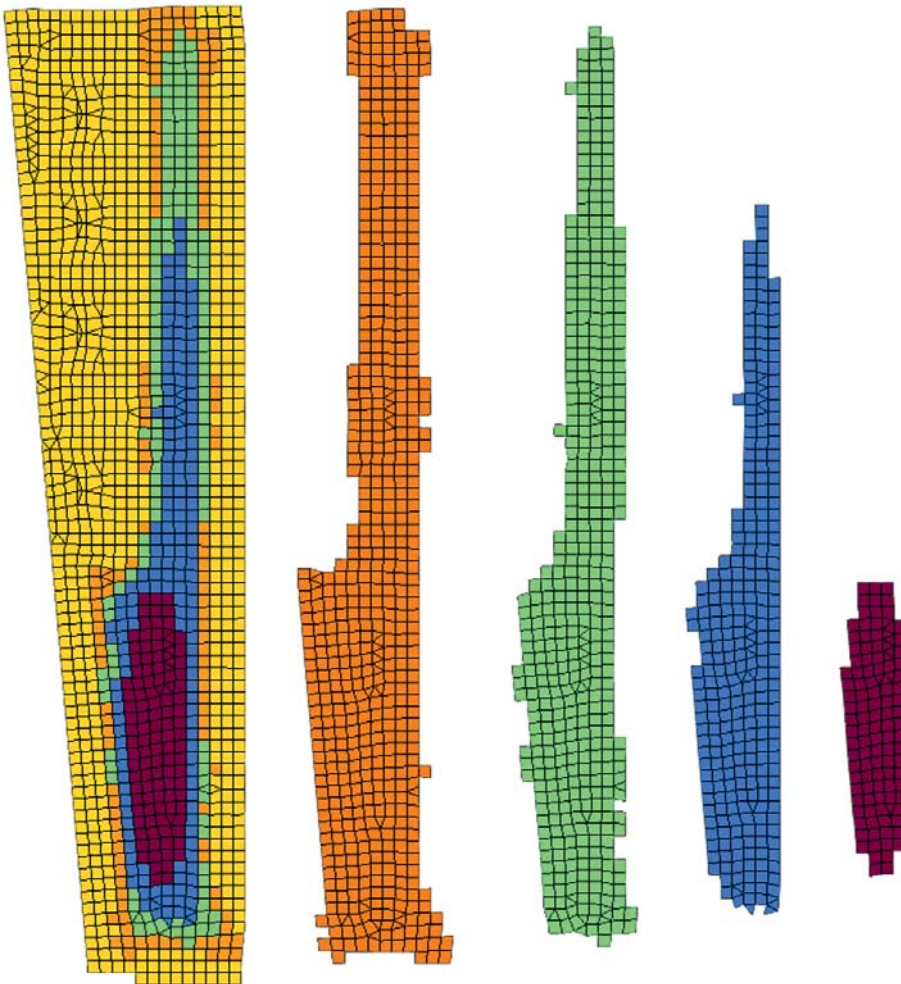


Рис. 1. Пример результатов распределения арматуры в конструкции
Fig. 1. Example of reinforcement distribution results in the structure



**Рис. 3.** Пример возможной укладки стержней в конструкции**Fig. 3.** Example of possible setting of the reinforcement bars**Рис. 4.** Пример разбиения на уровни раскладки армирования**Fig. 4.** Example of breakdown into reinforcement layout levels

Задача проектировщика – найти комбинацию арматуры, которая удовлетворяет требованиям расчета. Также комбинации стержней ограничены размерами конструкции, а расстояние между стержнями ограничено возможностями монтажа и заливки бетона.

Необходимо также учитывать унификацию арматурных стержней, т. к. это усложнит проектирование и производство работ на стройке.

Из формулы (1) делается вывод, что комбинация вариантов происходит за счет изменения диаметров стержней и их шага. Подбор арматуры происходит до тех пор, пока не выполняются условия расчета.

Для уменьшения расхода арматуры в плите результаты армирования разбиваются на различные уровни и участки, где на каждый участок подбираются свои комбинации арматуры (рис. 4).

Процесс проектирования и цифровая информационная модель

ЦИМ – это цифровая модель, в которой объекты в модели представляют объекты в реальности, такие как стена, перекрытие или фундамент.

Объекты в модели соответствуют как геометрическим, так и их физическим характеристикам, и таким образом можно использовать эту информацию для различных целей.

Использование ЦИМ дает множество преимуществ, например более эффективное координирование проекта.

В настоящее время также используется ЦИМ для выпуска проектной документации для раздела железобетонных конструкций.

Процесс создания модели состоит из следующих шагов.

- Конструктор создает модель железобетонных конструкций в расчетной программе. Задает нагрузки и их сочетания в соответствии с нормативными документами, проводит расчет конструкций.

- Проводится анализ расчетной схемы, а затем, если устраивают полученные результаты, проводится расчет армирования конструкций.

- После подбора армирования по расчету арматура экспортируется в ЦИМ программу, где инженер по результатам расчета выполняет армирование конструкций и оформление чертежа.

На данный момент в этом процессе используется несколько программ, процесс создания модели не согласован. Например, чтобы получить расчетную модель, приходится ее условно заново моделировать в отдельной программе, хотя она уже существует в ЦИМ программе. А также результаты расчета обратно в ЦИМ программу импортируются только в формате *jreg* или *dxl*, что влечет за собой потерю информации о результате расчета, что снижает пространство для маневра конструктору и добавляет дополнительный риск возникновения ошибок.

Кроме того, подрядчики или заказчики часто хотят быстро внести изменения в чертежи, чтобы исправить ошибки или выбрать другое решение.

Этому может препятствовать тот факт, что все изменения необходимо пересматривать несколькими участниками, и информация, передаваемая на перечисленных этапах получения результата, не хранится на постоянной основе.

Программное обеспечение, рассматриваемое в данной статье, предлагает способ устранения проблемы с передачей информации, т. к. позволяет соединить две модели, расчетную и физическую, в одной программе.

Методы оптимизации

При проектировании зданий всегда необходимо стремиться минимизировать затраты, влияние на окружающую среду, уменьшить сроки или риски для максимизации прибыли, качества или эффективности.

Чтобы найти наиболее оптимальное или эффективное решение среди всех возможных решений, можно использовать различные методы глобальной оптимизации.

Существует множество различных методов решения задач глобальной оптимизации, которые можно разделить на два класса: точные и эвристические.

Точные – это строгие методы, которые могут найти решение, которые гарантированно будут оптимальными или которые могут показать, что не существует допустимого решения. Они выполняют исчерпывающий поиск в пространстве возможных решений, что требует большого количества шагов. Для сложных или больших комплексных моделей это может быть чревато чрезмерной вычислительной нагрузкой.

Эвристические методы основаны на подсознательном мышлении и характеризуются неосознанным (интуитивным) способом действий для достижения осознанных целей. Эвристические методы еще называют методами инженерного (изобретательного) творчества.

В самом общем случае решить оптимизационную задачу – это значит найти наилучшее решение среди возможных вариантов [6–8].

Если оптимизация связана с расчетом оптимальных значений параметров при заданной структуре объекта, то она называется параметрической. Задача выбора оптимальной структуры является структурной оптимизацией.

Решение любой оптимизационной задачи основано на построении математической модели исследуемого объекта и проведении вычислительного эксперимента. Проведение вычислительного (компьютерного) эксперимента не с самим объектом, а с его моделью дает возможность эффективно исследовать его свойства в любых ситуациях.

На первом этапе эксперимента строится некий эквивалент объекта, его модель, отражающая в математической форме важнейшие свойства объекта.

Второй этап – разработка алгоритма для реализации модели на компьютере.

Модель представляется в форме, удобной для применения численных методов, определяется последовательность вычислительных и логических операций, которые нужно провести, чтобы найти искомые величины с заданной точностью. На третьем этапе создаются программы, реализующие алгоритмы на доступном компьютеру языке. Нахождение оптимальных значений параметров – это один из этапов вычислительного эксперимента, позволяющий выработать управляющее воздействие на объект исследования.

Создание программы для обработки и чтения результатов расчета

В процессе работ по данной теме была разработана программа, позволяющая объединить данные из расчетной модели с данными физической модели, выполненной в программе Revit.

Программа состоит из двух частей. Первая часть была выполнена для загрузки результатов расчета в программе Revit. Также данная часть программы позволит визуально контролировать раскладку арматуры в конструкциях (рис. 5).

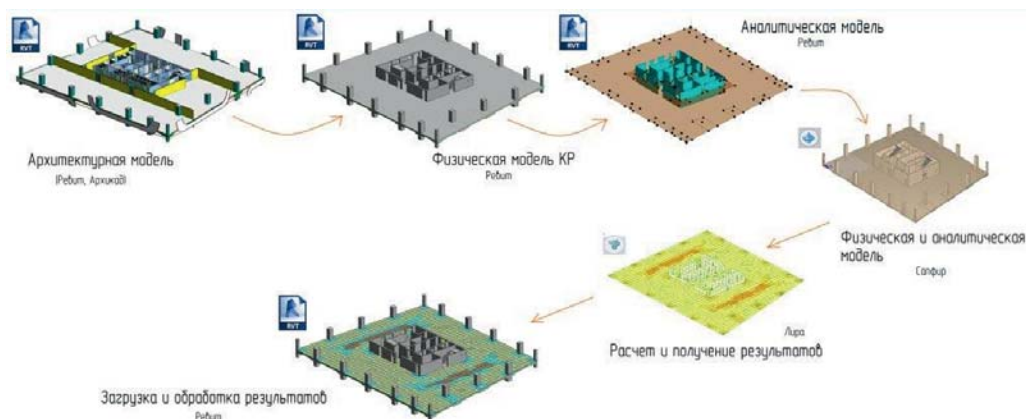


Рис. 5. Схема работы приложения
Fig. 5. Operation scheme of the application

В качестве исходных данных для загрузки в Revit используются текстовые отчеты из расчетной программы.

Обработка отчета из расчетного комплекса Lira-SAPR

Ввиду отсутствия методов, позволяющих собирать необходимую информацию автоматизировано, был выбран путь получения необходимых данных через текстовые отчеты.

Расчетная модель представляет из себя двух-, трех- и четырехузловые конечные элементы. Результаты расчета хранятся во внешнем файле.

Перечень необходимых данных для создания дубликата модели в Revit:

- координаты узлов;
- тип элемента и принадлежащие ему узлы;
- информация о результатах расчета для элемента.

Вся эта информация была получена из расчетного комплекса с помощью команды «книга отчетов».

На основе этих данных создается сводная реляционная база данных (таблица), позволяющая на следующем шаге ускорить построение дубликата расчетной модели в Revit.

Элементы

Свойство **элемента**, порядковый номер, может измениться, если пользователь проведет перенумерацию элементов в схеме, не рекомендуется проводить данную команду в Lira-SAPR, это приведет к необходимости повторной выгрузки всех данных.

Тип элемента отображает, что это за элемент:

- 10 – стержень;
- 42 – трехузловая пластина;
- 44 – четырехузловая пластина.

Номер жесткости – числовое значение, которое является ключом для типа жесткости из связанных таблиц.

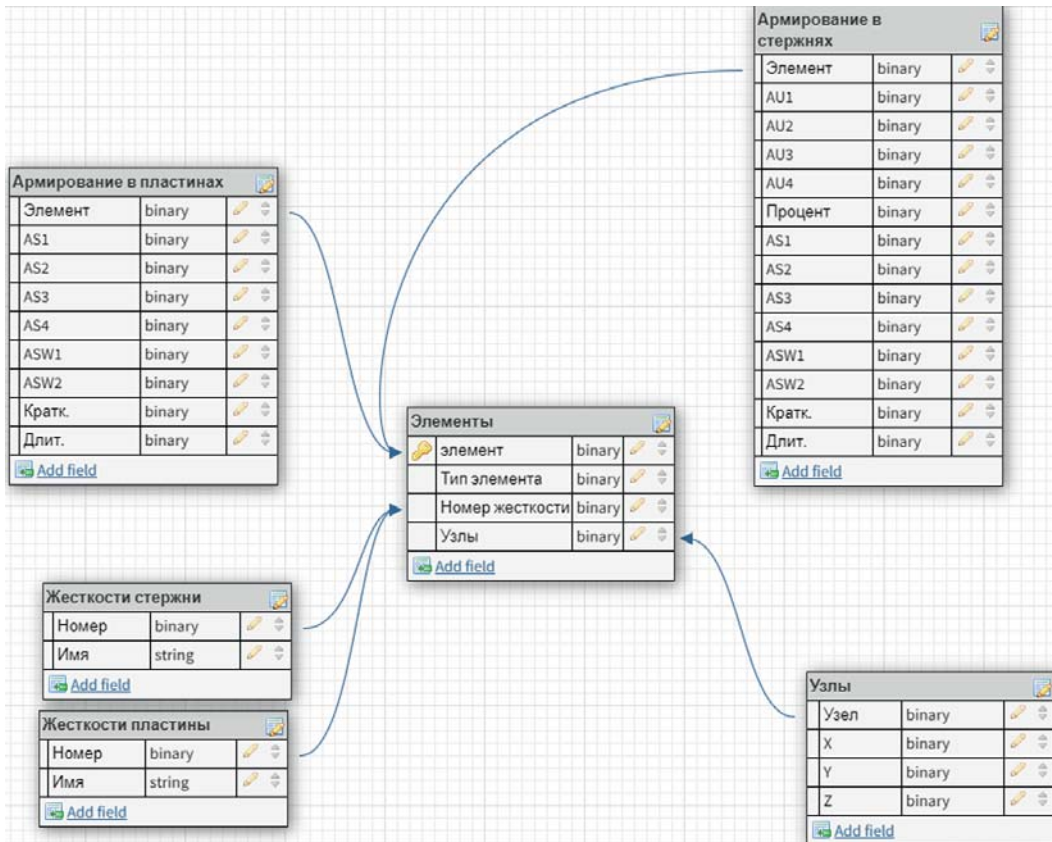


Рис. 6. Логическая схема данных

Fig 6. Logical schema

Узлы – список точек, на основе которых строится элемент, является ключом для таблицы «узлы».

Узел

Узел – порядковый номер точки.

XYZ – координаты.

Армирование в пластинах

Элемент – зависимое поле для таблицы «элементы».

Все оставшиеся колонки являются необходимыми данными для армирования.

Армирование в стержнях

Отличием данной таблицы, помимо свойств, является разбивка каждого элемента на дополнительные сечения.

Было необходимо предусмотреть сохранение свойств по всем сечениям.

- Также каждое сечение обладает свойствами:
- 1 строка – полная;
 - 2 строка – прочность;
 - 3 строка – кручение.

Создание копии модели в Revit

Исходными данными являются объединенные данные из предыдущего шага по выгрузке и сведению в единую таблицу результатов.

Для создания дубликатов был выбран способ создания не редактируемой геометрии в Revit DirectShape. Данный способ позволяет создавать наиболее легкую с точки зрения обработки модель, а также позволяет быть уверенным, что ни один из пользователей не изменит модель при работе в программе.

Чтение и визуализация результатов расчета в Revit

Результатом предыдущего шага является создание дубликата расчетной модели, которая обладает всеми свойствами результатов расчета.

Для удобства чтения результатов расчета, как правило, используется цветовая шкала на базе числовых значений в элементах.

Для создания цветовой шкалы необходимо выбрать инструмент Analysis Visualisation Framework Revit. Данный фреймворк является системным инструментом Revit и полностью удовлетворяет требованиям проектировщика (рис. 7, 8).

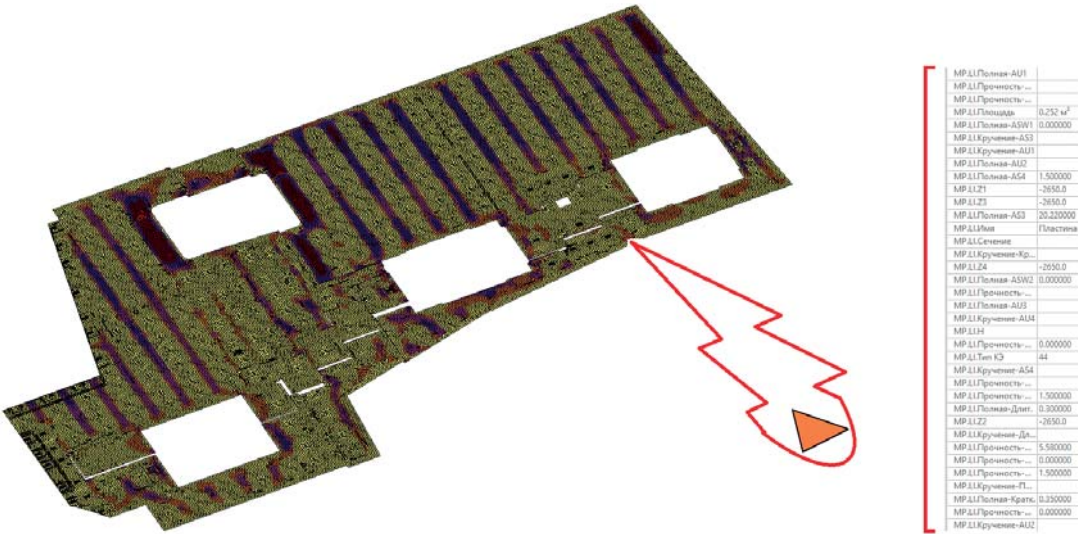


Рис. 7. Созданный дубликат расчетной схемы в Revit
Fig. 7. Created duplicate of the calculation scheme in Revit

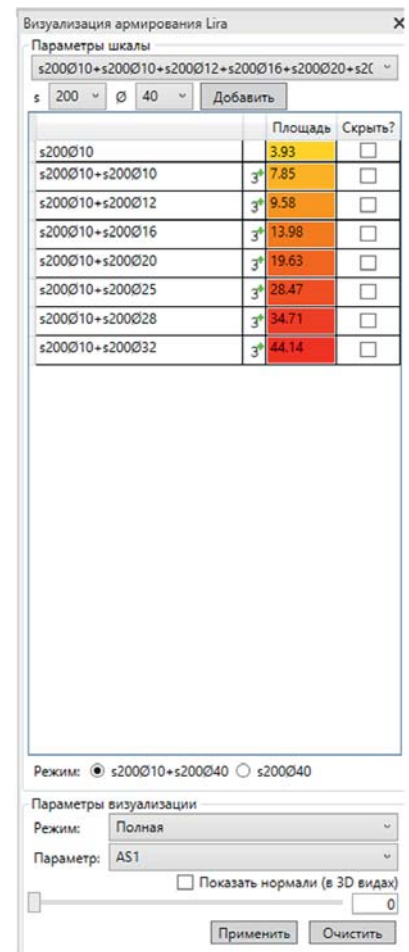
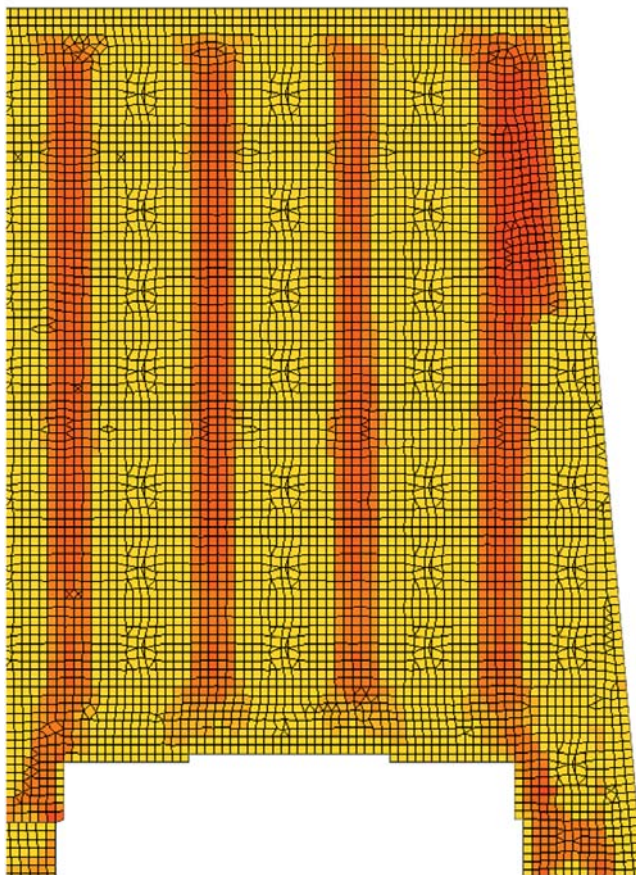


Рис. 8. Пример настройки цветовой шкалы по результатам расчета
 Fig. 8. Example of setting the color scale based on the calculation results

Решение по оптимизации раскладки армирования в плите

Программу необходимо разрабатывать для выполнения нескольких задач, которые выполняет инженер-конструктор при проектировании железобетонной конструкции. В частности, задачу армирования – для обеспечения достаточного количества арматуры на всех участках конструкции (рис. 9), а также выполнения требований расстояния между стержнями, длины анкеровки и других правил в соответствии с нормативными документами.

В качестве исходных данных необходимо использовать входные данные о требуемом армировании. Обработанные данные программы – это предложенные схемы армирования, а также общий расход и количество типов используемых арматурных стержней.

В соответствии с обычным процессом проектирования конструкций программу можно разделить на три основных модуля. Блок-схема представлена на рис. 10.

Первый модуль – выбор комбинации типов арматурных стержней и шагов между центрами стержней, а также того, как расположены зоны армирования. Эти переменные выбираются таким образом, чтобы ограничить используемую избыточно арматуру, не применяя слишком

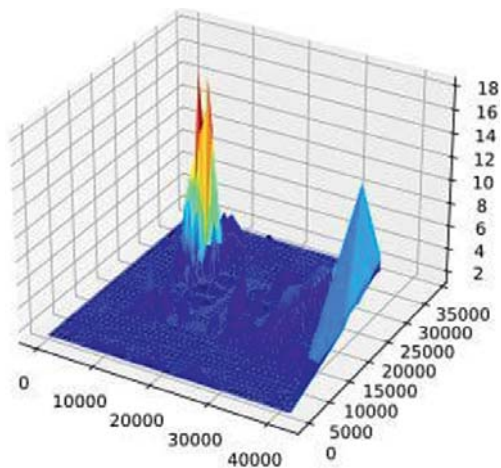


Рис. 9. Пример распределения требуемой арматуры по расчету в конструкции
Fig. 9. Example of distribution of required reinforcement in the structure by calculation



Рис. 10. Блок-схема приложения
Fig. 10. Schematic diagram of the application

много различных комбинаций, которые могут привести к усложнению конструкции. Вторым модулем используется различные слои армирования для расчета необходимой длины анкеровки в зависимости от результатов модуля 1.

Наконец, третий модуль необходим для регулировки типов арматуры, чтобы найти необходимый компромисс между количеством различных длин стержней и избыточным расходом арматуры от регулировки этих длин.

Выводы

1. Предложены методы оптимизации армирования конструкций.
2. Разработан алгоритм оптимизации по армированию плит перекрытия.
3. Данные методы и алгоритмы оптимизации позволяют ускорить процесс проектирования, экономить время при производстве работ.
4. Проанализированы возможности отечественного программного обеспечения для расчета конструкций и связи с ТИМ программами.
5. Созданы инструменты по обработке результатов расчета, созданию дубликата расчетной модели в среде проектирования и созданию инструментов по анализу результатов расчета.
6. Данная работа позволяет разработать программное обеспечение по автоматизации армирования с применением генетического алгоритма оптимизации.

Список литературы

1. Панченко Т.В. Генетические алгоритмы. Астрахань: Астраханский университет; 2007.
2. Лебедев В.М. Системотехника и системокванты строительного производства. Москва: Инфра-М; 2018.
3. ГОСТ 2.105-95. Единая система конструкторской документации. Общие требования к текстовым документам [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001260>
4. ГОСТ 2.106-96. Единая система конструкторской документации. Текстовые документы [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001979>
5. ГОСТ 2.109-73. Единая система конструкторской документации. Основные требования к чертежам [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200001992>
6. Пантелеев А.В., Летова Т.А. Методы оптимизации в задачах и примерах. Москва: Высшая школа; 2005.
7. Кохендерфер М., Уилер Т. Алгоритмы оптимизации. Санкт-Петербург: Диалектика; 2020.
8. Кочегурова Е.А. Теория и методы оптимизации. Томск: Изд-во Томского политехнического ун-та; 2013.
9. ГОСТ 7.32-2001. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200026224>
10. ГОСТ Р 7.0.5-2008. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200063713>

References

1. Panchenko T.V. Genetic algorithms. Astrakhan: Astrakhan University; 2007. (In Russian).
2. Lebedev V.M. System engineering and system components of construction production. Moscow: Infra-M Publ.; 2018. (In Russian).
3. State Standard 2.105-95. Unified system for design documentation. General requirements for textual documents [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200001260> (In Russian).

4. State Standard 2.106-96. Unified system for design documentation. Textual documents [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200001979> (In Russian).
5. State Standard 2.109-73. Unified system for design documentation. Basic requirements for drawings [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200001992> (In Russian).
6. *Panteleev A.V., Letov T.A.* Optimization methods in problems and examples. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2005. (In Russian).
7. *Kohenderfer M., Wheeler T.* Algorithms for Optimization. Cambridge, Massachusetts: The MIT Press; 2019. (In Russian).
8. *Kochegurova E.A.* Theory and methods of optimization. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2012. (In Russian).
9. State Standard 7.32-2001. System of standards on information, librarianship and publishing. The research report. Structure and rules of presentation [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200026224> (In Russian).
10. State Standard R 7.0.5-2008. System of standards on information, librarianship and publishing. Bibliographic reference. General requirements and rules of making [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200063713> (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Александр Анатольевич Квасников, канд. техн. наук, руководитель центра научно-технического обеспечения НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Alexander A. Kvasnikov, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Center for Scientific and Technical Support, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Евгений Владимирович Сумароков[✉], руководитель отдела цифровых технологий центра научно-технического обеспечения НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: esumarokov@cstroy.ru

Evgeny V. Sumarokov[✉], Head of the Unit of Digital Technologies, Center for Scientific and Technical Support, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: esumarokov@cstroy.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 62-503.55:624.05:004.01; 006.02; 65.011.56

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-151-158](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-151-158)

EDN: ZLTFKG

МАШИНОЧИТАЕМЫЕ ДОКУМЕНТЫ В СТАНДАРТАХ ПО ИНФОРМАЦИОННОМУ МОДЕЛИРОВАНИЮ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

А.Д. КРЫЛОВ

Акционерное общество «Государственный Специализированный Проектный Институт», ул. Шарикоподшипниковая, д. 4, г. Москва, 115088, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Применение технологий информационного моделирования в строительстве обязательно для всех проектов, возводимых с участием государственного финансирования, с 2021 года.

При этом за прошедшие два года процессы возведения зданий и сооружений остались без изменений. Эффект экономии времени от цифровизации в строительстве остался не достигнутым, а необходимость разработки информационных моделей объектов капитального строительства обернулась дополнительными затратами на ручную идентификацию данных в массиве выпущенных регламентирующих документов и игнорировании большей части уже существующих требований. Требования нормативно-технических документов, даже если они написаны для целей автоматизации, не предусматривают возможности автоматизированного вычленения данных при работе с ними.

Целью статьи является разработка методов перевода нормативно-технической документации в машиночитаемый формат на основе разметки документа кодами классификатора строительной информации.

Материалы и методы. Проведен анализ схем документов, размещенных на сайте Минстроя, выпущенных после внесения требований в Градостроительный кодекс РФ об обязательном применении системы классификации при разработке информационных моделей объектов капитального строительства. Анализ предусматривал возможность однозначной идентификации данных между различными XML-схемами документов и наличие применения классификатора строительной информации для сопряжения с графической частью проектной документации, выполненной в формате информационной модели объекта капитального строительства.

Результаты. Для разработки XML-схем предложены правила построения текстовых и табличных документов с включением кодов классификатора строительной информации. Для отделения структурированных и неструктурированных частей документа предложено выделение и разметка табличной части. Размеченная табличная часть может быть выгружена в системы автоматизированного проектирования и являться источником настроек программных комплексов. Кодированию подлежат таблицы, информация в тексте документа о наличии структурированных закодированных таблиц и раздел терминов и определений, которые используются для формирования машиночитаемых данных.

Выводы. Машиночитаемые документы можно формировать как на уровне национальной нормативно-технической документации, так и на уровне стандартов организации с отражением текущей настройки программных комплексов, принятых для реализации проекта возведения объектов капитального строительства. Набор структурированных таблиц, выгруженных из стандартов организаций и национальной нормативно-технической документации, можно принять как замену сложившегося подхода по формированию требований к информационному обмену и планов реализации проектов с применением технологий информационного моделирования.

Ключевые слова: ТИМ, машиночитаемые документы, КСИ, EIR, BEP, информационное моделирование в строительстве

Для цитирования: Крылов А.Д. Машиночитаемые документы в стандартах по информационному моделированию в строительстве. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;37(2):151–158. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-151-158](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-151-158)

Вклад автора

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

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 24.04.2023

Поступила после рецензирования 15.05.2023

Принята к публикации 23.05.2023

MACHINE-READABLE DOCUMENTS IN BUILDING INFORMATION MODELING STANDARDS

A.D. KRYLOV

JSC State Specialized Planning Institute (SSPI), Sharikopodshipnikovaya str., 4, Moscow, 115088, Russian Federation

Abstract

Introduction. Since 2021, adoption of building information modeling technologies has become mandatory in constructing objects using information modeling technologies. Processes of constructing buildings and structures have remained unchanged over the past two years. The time-saving effect of digitalization in construction has not been achieved, and the need to develop information models of capital construction objects resulted in additional costs for manual identification of data in the array of regulatory documents and in ignoring most of the existing requirements. Standard technical documents, even if they are written for automation purposes, do not provide for possible automated data isolation when working with them.

Aim: to develop methods for translating standard technical documents into a machine-readable format based on marking up documents with codes of a building information classifier.

Materials and methods. The methodology involved analyzing the schemes of documents posted on the website of the Ministry of Construction, which have been issued after the requirements on mandatory use of the classification systems in the development of building information models were included into the Town Planning Code of the Russian Federation. The analysis provided for possible unambiguous identification of data between various XML schemes of documents and the availability of a building information classifier for interfacing with the graphic part of the design documentation made in the format of the information model of the capital construction object.

Results. The author proposes rules for constructing text and tabular documents with the inclusion of codes of the building information classifier for the development of XML-schemes. Allocation and markup of the tabular part serve for separating the structured and unstructured parts of the document. The marked tabular part can be exported to CAD systems and can serve a source of software settings. Tables, information about the structured coded tables, and a section of terms and definitions that are used to form the machine-readable data are subject to coding.

Conclusion. Machine-readable documents can be generated both at the level of national standard technical documents and at the level of company standards reflecting the current configuration of the software adopted for capital construction projects. A set of structured tables exported from the company standards and national

standard technical documents can be adopted to replace the established approach to the formation of requirements for information exchange and project implementation plans using information modeling technologies.

Keywords: BIM, machine-readable documents, building information classifier, EIR, BEP, information modeling in construction

For citation: Krylov A.D. Machine-readable documents in building information modeling standards. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):151–158. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-151-158](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-151-158)

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 24.04.2023

Revised 15.05.2023

Accepted 23.05.2023

Технологическая революция из года в год привносит все больше инноваций в строительное производство. В настоящий момент уже не представить большую стройплощадку без систем автоматизированного проектирования, систем учета и документооборота. Однако большинство процессов при внедрении технологий информационного моделирования (ТИМ) все так же не автоматизированы и представляют процесс ручного труда человека по перекладыванию данных из таблички в табличку на экране монитора.

Традиционное принятие технологий информационного моделирования в строительстве происходит через несколько стадий «уровней зрелости BIM» [1]. Их можно рассмотреть с точки зрения способов передачи информации, которые могут происходить в формате «на словах», без использования средств автоматизации, с применением программных продуктов как с простым заведением всех данных вручную, так и с глубокой автоматизацией процессов с исключением повторных вводов данных вплоть до полного исключения человека, с применением искусственного интеллекта (ИИ) типа Chat GPT [2].

В настоящий момент системы ИИ набирают популярность и по результатам апробаций работы GPT, например при написании макросов на языке VBA в Excel [3], применение ИИ дает очень большое ускорение работы. Дело в том, что ИИ на базе GPT свободно работает как с человеческими языками, так и с языками программирования, и в перспективе аналогичные разработки станут существенными помощниками инженеров-строителей. Однако, как отмечают пользователи ИИ, система представляет результат на основе исходных данных, являющихся источником обучения, а если в исходных данных есть неувязки, нестыковки или неточности, ИИ примет их как догму, на которой и будет строить противоречивые и неточные ответы.

Существующая нормативно-техническая документация (НТД) имеет много противоречий в области терминов, определений и значений, и до их устранения ИИ не сможет строить однозначные ответы.

Для автоматизации процессов работы с 2019 года начал внедряться классификатор строительной информации [4] (КСИ), разработанный для машиночитаемой разметки. Потенциал его использования еще предстоит раскрыть. Схемы, публикуемые на сайте Минстроя, так и не отражают необходимость внедрения технологий информационного моделирования и применения КСИ, закрепленные в Градостроительном кодексе и соответствующих постановлениях.

Схема пояснительной записки, разработанная Главгосэкспертизой (ГТЭ), дает возможность загрузки структуры хранения разделов и заполнения текстовых параметров, характеризующих сведения об объекте капитального строительства. По «маркерам идентификации» структуры файла XML можно считать данные при использовании системы, поддерживающей формат чтения схемы. При этом для идентификации данных в схеме не используется классификатор строительной информации, являющийся обязательным для построения информационной модели. Для разметки документации введены уникальные для схемы кодовые обозначения. Это является системной проблемой, не дающей возможности обработки массивов документов по единым правилам.

В настоящий момент на сайте ФАУ «ФЦС» представлен реестр сводов правил [5], состоящий из 608 документов. И наиболее эффективным переводом их в машиночитаемый формат является необходимость исключения возможности отступлений от единой системы идентификации.

Для повышения качества ведения строительства с применением ТИМ необходимо пересмотреть сложившейся формат построения XML-схем и предусмотреть возможность их формирования непосредственно из стандартов, с возможностью их использования для настройки программных комплексов [6].

Машиночитаемая разметка документов

Типовая структура документа состоит из содержания, списка определений, текстовой, графической и табличной частей, а также списка используемой литературы. Для настройки программных комплексов интересна информация, которая имеет простое представление определенного параметра и список возможных значений для этого параметра. В стандартах, предназначенных для чтения человеком, чаще такое описание можно встретить при составлении таблиц. Однако хаотичная структура построения таблицы зачастую не дает возможности использовать данную информацию для настройки программных комплексов без полной переработки.

Для формирования стандартов, предназначенных для чтения человеком, с возможностью их загрузки в программные комплексы, необходимо ввести правила цифровой разметки СП.

Они могут быть достаточно простыми и заключаться в необходимости маркировки кодами классификатора строительной информации шапки таблицы и хотя бы одной колонки для возможности навигации в таблице с применением средств автоматизации.

Чтобы таблица была читаемой, разметить кодами классификатора также стоит раздел «термины и определения». Классификатор строительной информации составлен как набор терминов, перечисленных в ГОСТ, СП и постановлениях НТД. Разметка терминов и определений стандарта позволит выявить необходимость расширения классификатора новыми терминами на этапе их принятия, тем самым сократив затраты времени на актуализацию КСИ.

После разметки таблицы в содержании необходимо указать наличие структурированной информации в одном из разделов документа. Для этого необходимо ввести два «тэга»: неструктурированная информация, то есть та, которая предназначена для чтения человеком; структурированная информация, которая предназначена для чтения человеком и машиной.

Так как выявление новых терминов, необходимых для настройки прикладных строительных программных продуктов, неизбежно, помимо разметки терминов в стандарт необходимо включить приложение «протокол расширения классов КСИ» для передачи сведений по необходимости расширения оператору классификатора.

Таким образом мы получаем систему стандартов, предназначенных для чтения и человеком, и машиной. При этом атрибутивный состав, необходимый для настройки программных комплексов, становится единым. Применяя правила кодирования, тактовые документы, предназначенные для чтения человеком, можно дополнять кодами классификатора, используя маркер разделитель «Хэштэг» (#), что дает возможность оперативной работе с документов сразу в двух форматах на этапе подготовки и формирования документа. Эта же разметка дает представление, как будут называться параметры в файле XML, когда он будет опубликован в виде схемы для подключения программных продуктов, с возможностью проведения



Рис. 1. Вопросы «машиночитаемости» в структуре документа
Fig. 1. "Machine readability" in document structure

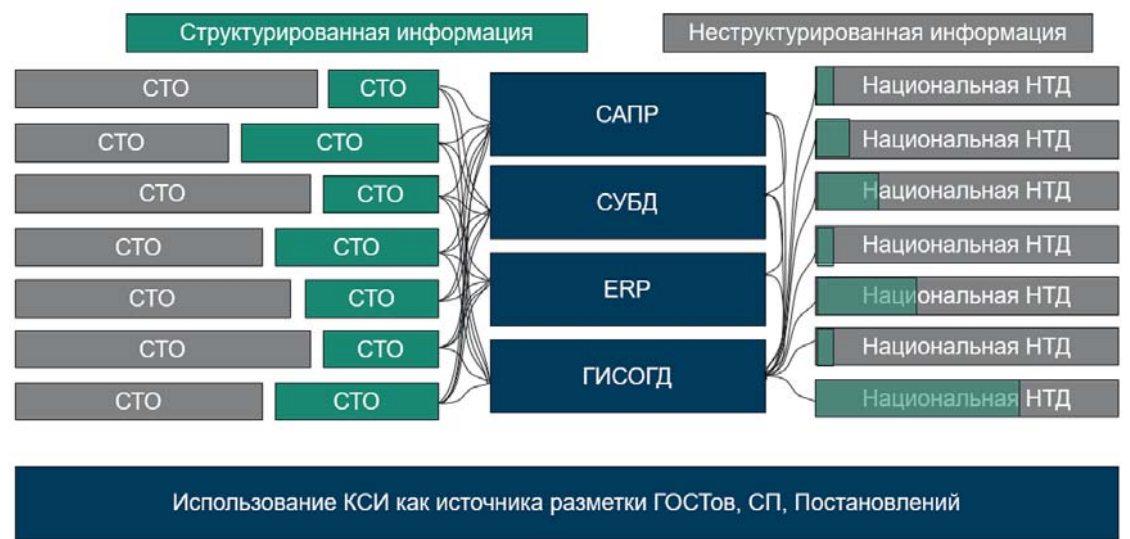


Рис. 2. Схема представления обмена информацией между НТД и ПО
Fig. 2. Scheme of information exchange between standard technical document and software

проверки на коллизии между стандартами, аналогичной проверке коллизий параметров разделов проектной документации.

При этом подобные машиночитаемые стандарты можно выпускать как на уровне СП, так на уровне СТО, которые можно использовать как доказательную базу соответствия регламента о безопасности зданий и сооружений. Примером таких стандартов может стать описание формата ведомости объемов работ, спецификаций материалов и изделий для нанесения на чертежи, экспликаций зданий и сооружений, помещений и других сведений, необходимых для передачи между участниками строительства объекта, выполняющих свои части работы на разных этапах и различных программных комплексах.

Существующая практика информационного моделирования предполагает наличие документов:

- «Требования к информационному обмену» (EIR), описывающие требования применения технологий информационного моделирования к группе исполнителей как приложения к договору;
- «План реализации проекта» (BEP), описывающий способ их достижения, заполняемого всеми участниками строительства.

При разработке машиночитаемых СТО набор структурированных таблиц, пригодных для настройки программных комплексов, и будет являться шаблоном данных документов, описывающих форматы электронных отчетов, атрибутов, областей классификации и других настроек программных комплексов, принятых в организации. Элементы данной практики были апробированы авторами статьи в ходе организации процессов девелоперской деятельности [7].

Заключение

Программные комплексы, широко применяемые для организации процессов управления строительством, всегда будут отражать действующую нормативно-техническую документацию. Требования по переходу на технологии информационного моделирования должны подкрепляться стандартами и предоставлять средства автоматизации включения данных из текста стандарта в информационные модели. Применение искусственного интеллекта может существенно помочь автоматизировать процессы, если в источниках данных обеспечено полноценное исключение ошибок, заложена структура и единые правила машиночитаемой разметки. Чем быстрее мы начнем формировать стандарты, предназначенные для работы в программных комплексах, тем быстрее мы шагнем на следующую ступень информационной зрелости, экономя время на обработку данных человеком, передавая эту рутину программным комплексам.

Список литературы

1. Талапов В. Технология BIM: стандарты, классификаторы, уровни зрелости. САПР и графика [интернет]. 2015;(2). Режим доступа: <https://sapr.ru/article/24774>
2. Нейросеть Chat GPT на русском [интернет]. Режим доступа: <https://gpt-chatbot.ru/>
3. Используем ChatGPT при работе в Excel [интернет]. Режим доступа: youtube.com/watch?v=uor4N7w6xu0
4. Волкодав В.А., Волкодав И.А. Разработка структуры и состава классификатора строительной информации для применения BIM-технологий. Вестник МГСУ. 2020;(6):867–906. <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.6.867-906>
5. Государственный реестр сводов правил [интернет]. Режим доступа: <https://www.faufcc.ru/technical-regulation-in-construction/formulary-list/>
6. Челышков П.Д., Волков А.А., Бачурина С.С., Бабушкин Е.С., Лысенко Д.А. Подходы к формированию системы цифровых нормативно-технических документов в строительном комплексе. Промышленное и гражданское строительство. 2022;(1):46–51. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.01.46-51>
7. Крылов А.Д. BIM как система обеспечения прозрачности строительства. Isicad [интернет]. 2019. Режим доступа: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20830

References

1. Talapov V. BIM technology: standards, classifiers, maturity levels. SAPR i grafika = CAD and Graphics [internet]. 2015;(2). (In Russian). Available at: <https://sapr.ru/article/24774>
2. GPT – Chatbot [internet]. (In Russian). Available at: <https://gpt-chatbot.ru/>
3. Using ChatGPT when working in Excel [internet]. (In Russian). Available at: youtube.com/watch?v=uor4N7w6xu0
4. Volkodav V.A., Volkodav I.A. Development of the structure and composition of a building information classifier towards the application of BIM technologies. Vestnik MGSU = Monthly Journal on Construction and Architecture. 2020;(6):867–906. (In Russian). <https://doi.org/10.22227/1997-0935.2020.6.867-906>
5. The State Register of Codes of Rules [internet]. (In Russian). Available at: <https://www.faufcc.ru/technical-regulation-in-construction/formulary-list/>
6. Chelyshkov P.D., Volkov A.A., Bachurina S.S., Babushkin E.S., Lysenko D.A. Approaches to the formation of a system of digital normative and technical documents in the construction complex. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial And Civil Engineering. 2022;(1):46–51. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2022.01.46-51>
7. Krylov A.D. BIM as a system for ensuring transparency of construction. Isicad [internet]. 2019. (In Russian). Available at: https://isicad.ru/ru/articles.php?article_num=20830

Информация об авторе / Information about the author

Алексей Дмитриевич Крылов, главный специалист отдела информационного моделирования АО «Государственный Специализированный Проектный Институт», Москва

e-mail: adkrylov@aogspi.ru

тел.: +7 (921) 915-58-95

Alexey D. Krylov, Leading Specialist, Information Modeling Unit, JSC State Specialized Planning Institute, Moscow

e-mail: adkrylov@aogspi.ru

tel.: +7 (921) 915-58-95

УДК 168

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-159-168](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-159-168)

EDN: ZRCJZK

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ: ЛОГИКА И МЕТОДОЛОГИЯ

А.П. ФЕДОРКИНА, д-р философских наук

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

Аннотация

Введение. В статье раскрыты особенности и взаимосвязь таких категорий, как наука, научная деятельность, научно-исследовательская деятельность. Дано определение научно-исследовательской деятельности как целенаправленного процесса познания, имеющего свою логику и методологию, систему понятий, законов и категорий. Эта деятельность связана с обоснованием необходимости научного поиска и решения теоретических и практических задач, проведением исследований и экспериментов в целях расширения имеющихся и получения новых знаний.

Цель. Развитие профессиональных компетенций, связанных с пониманием теоретических и методологических основ научно-исследовательской деятельности. Раскрыты сущность и содержание научно-исследовательской деятельности, ее подчиненность установленным нормам и правилам. Проанализированы основные содержательные характеристики научно-исследовательской деятельности: актуальность научного исследования, объект, предмет, цель, задачи, обоснованность результатов, доказательность обобщений и выводов научного исследования.

Материалы и методы. В статье анализируется также прикладной смысл понятия методологии как системы подходов и принципов не только теоретической, но и практической исследовательской деятельности, на которые опирается ученый в рамках применения методов исследования. В качестве примера раскрыто содержание практических методов – наблюдения и эксперимента. Наблюдение определяется как подчиненное задачам исследования преднамеренное и целенаправленное восприятие явлений и процессов без прямого вмешательства в их течение. Эксперимент как метод, предполагающий исследование в контролируемых и управляемых условиях.

Ключевые слова: наука, научно-исследовательская деятельность, логика, методология, объект, предмет, методы научного исследования

Для цитирования: Федоркина А.П. Научно-исследовательская деятельность: логика и методология. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;37(2):159–168. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-159-168](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-159-168)

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 интересов.

Поступила в редакцию 14.04.2023

Поступила после рецензирования 27.04.2023

Принята к публикации 02.05.2023

RESEARCH ACTIVITIES: LOGIC AND METHODOLOGY

A.P. FEDORKINA, Dr. Sci. (Philosophy)

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

Abstract

Introduction. The paper reveals the peculiarities and interrelation of such categories as science, scientific activities, research activities. Research activity is defined as a purposeful cognitive process, which has its own logic and methodology, a system of concepts, laws and categories. This activity is associated with justifying the need for scientific inquiry and solving theoretical and practical tasks, as well as with conducting research and experiments in order to expand existing and obtain new knowledge.

Aim. To develop professional competences related to the understanding of theoretical and methodological foundations of research activities. The study revealed the essence and content of research activities, their compliance with established standards and rules. The main content characteristics of research activities were analyzed: relevance of scientific research, its object, subject, aim, objectives, validity of results, evidence of generalizations and conclusions of scientific research.

Materials and methods. The paper analyzes the applied meaning of the concept of methodology as a system of approaches and principles of practical and theoretical research activities, on which the researcher relies in applying the research methods. As an example, the content of practical methods – observation and experiment – is revealed. Observation is defined as a research-focused, deliberate and purposeful perception of phenomena and processes without direct intervention in their course. Experiment as a method that involves research under controlled and managed conditions.

Keywords: science, research activities, logic, methodology, research object, research subject, research methods

For citation: Fedorkina A.P. Research activities: logic and methodology. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;37(2):159–168. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2\(37\)-159-168](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-2(37)-159-168)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the study.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 14.04.2023

Revised 27.04.2023

Accepted 02.05.2023

История и современное состояние научного знания убедительно показывают, что успешное решение теоретических и практических задач, стоящих перед обществом, должно опираться на определенную систему научных принципов и средств. Важную роль в их решении играют научные исследования, которые в каждой сфере профессиональной деятельности требуют развития и совершенствования. Это относится и к сфере строительства, которая должна постоянно развиваться с точки зрения методов проектирования, применения новых эффективных материалов и конструкций, технологических приемов, новых высокопроизводительных машин и механизмов и т. д. Создание таких новшеств связано с большой и сложной работой, выполнение которой требует специально подготовленных кадров,

особого оборудования, больших материальных средств. Такая работа осуществляется научно-исследовательскими институтами, которые решают сложные инженерные задачи. Большое внимание решению практических и теоретических задач строительной отрасли народного хозяйства уделяется АО «НИЦ «Строительство», занимающимся исследованием подземных сооружений, железобетона и других строительных материалов, разработкой новых конструкций и технологий, проблемами организации и механизации строительства и т. д. Эта исследовательская работа связана с подготовкой и обучением профессиональных кадров, которые занимаются не только практической, но и научно-исследовательской деятельностью, применяя самые новейшие открытия и технологии, используемые в данной сфере. Подготовка и развитие таких кадров требуют решения целого ряда вопросов, в том числе развития компетенций, связанных с пониманием теоретических и методологических основ научно-исследовательской деятельности как особого вида профессиональной деятельности, имеющего свою специфику, логику и методологию.

Предпосылкой понимания научно-исследовательской деятельности является уяснение целого ряда теоретических и практических вопросов. К таким вопросам относится, прежде всего, понимание сущности и содержания науки как особого феномена, влияющего на жизнь общества.

По своему содержанию наука представляет ту сферу человеческой деятельности, которая направлена на выработку и систематизацию знаний о различных сферах развития общества и человека. Основой этой деятельности является сбор фактов, их постоянное обновление и систематизация, критический анализ и синтез новых знаний или обобщений, которые не только описывают наблюдаемые природные или общественные явления, но и позволяют построить причинно-следственные связи с целью их развития и прогнозирования.

Непосредственными целями науки является описание, объяснение и предсказание процессов и явлений действительности, составляющих предмет ее изучения, на основе открываемых ею же законов, т. е. наука является теоретическим отражением действительности.

В современных условиях ни один серьезный вопрос или проблему нельзя эффективно решить, не опираясь на науку. При этом на пути решения научных задач стоят как технические, так и психологические трудности. Это связано с тем, что человеку за период своего жизненного цикла приходится три или даже четыре раза переучиваться, овладевать новыми знаниями, концепциями, методами, осваивать принципиально новые технические средства исследовательской деятельности, особенно в быстроразвивающихся областях научного знания.

С этой точки зрения науку можно также рассматривать как непрерывно развивающуюся систему знаний об объективных законах природы, общества и мышления, получаемую в результате специальной деятельности и превращающуюся в непосредственную производительную силу. Характерной особенностью науки является то, что ее развитие происходило и происходит стремительными темпами. Доказательством этого является двойное увеличение научных знаний в мире каждые 10–15 лет и то, что именно наука явилась главным локомотивом научно-технических открытий, приведших к появлению ТИМ-технологий, искусственного интеллекта, электронной формы человеческих знаний и др. [1, с. 28–29].

При этом надо также иметь в виду, что процесс развития науки в различных отраслях знания не является однолинейно позитивным и связан с отрицанием старых и появлением новых знаний. В результате отдельные знания, которые в определенный момент считались истинными, с появлением новых знаний перестают быть таковыми. Поэтому в оценке истинности или обоснованности тех или иных научных знаний важно учитывать, что в процессе

их развития, наряду с наличием общепризнанных, содержатся также проблемные, вероятностные и неуточненные знания. То есть научные знания в тот или иной исторический период времени нельзя считать абсолютно истинными, поэтому важно признавать их относительность, допустимость возможных изменений и необходимость периодической ревизии.

Развитие научных знаний связано с научно-исследовательской деятельностью, которая подчинена определенным требованиям. Эти требования обусловлены природой этой деятельности, а именно тем, что она имеет творческий характер, направлена на получение новых знаний о природе, обществе, человеке и ориентирована на их использование для поиска и актуализации новых способов их применения. Эта деятельность связана также с обоснованием научного поиска, проведением исследований и экспериментов в целях расширения имеющихся и получения новых знаний, а также проверкой научных гипотез, выявлением закономерностей, проявляющихся в различных сферах профессиональной деятельности.

С точки зрения содержания научно-исследовательская деятельность представляет собой целенаправленное познание, результаты которого выступают в виде системы понятий, законов и категорий.

К основным характеристикам научно-исследовательской деятельности относятся: систематичность, включая упорядоченность самого процесса исследования и его результатов; доказательность и последовательность обоснования сделанных обобщений и выводов; целенаправленность как умножение знаний о том или ином объекте и предмете [2, с. 61–66].

Решение научно-исследовательских задач имеет свою логику. Важную роль в этом процессе играет понимание соотношения таких понятий, как проблематика и проблема исследования. При этом в каждой сфере профессиональной деятельности их характеристики имеют свои особенности. Так, в сфере строительства любая проблема, подлежащая решению не только теоретически, но и практически, всегда связана с комплексом других проблем. Эта совокупность проблем и называется проблематикой. Необходимость определения проблематики вытекает из того, что система практической деятельности включает в себя множество подсистем и входит в другие, более общие и сложные системы – надсистемы, а решение поставленной проблемы требует учета последствий для всех из них [3, с. 260]. Например, строительство здания имеет свою проблематику, без осмысления и принятия которой само по себе строительство невозможно. К ней, прежде всего, относится наличие проектной документации, что связано с особым видом практической деятельности как предпосылкой решения широкого спектра технических и организационных проблем, в том числе связанных с созданием подсистем, которые должны отвечать различным градостроительным условиям. Это связано также с наличием разрешительной документации, получение которой обусловлено еще одним видом практической деятельности. Это также необходимость решения целого ряда финансовых, земельно-правовых, социальных, экологических и ряда других проблем. Поэтому с учетом проблематики как совокупности многих сопредельных в научно-исследовательской деятельности проблем важно конкретизировать научную проблему и задачи, которые необходимо решать исследователю [4, с. 19–24].

В связи с этим отметим, что по своему содержанию научную проблему условно можно определить как «знание о незнании». С гносеологической точки зрения определенная и конкретизированная исследователем проблема требует специфической формы организации исследовательской деятельности, объектом которой является не непосредственная

предметная реальность, а состояние научного знания о ней [5, с. 42–143]. Научная проблема формулируется с помощью лексико-синтаксических конструкций, фиксирующих знание о том, что в науке пока нет окончательного осмысления поставленной проблемы. Поэтому для ее четкой формулировки необходимой предпосылкой является обобщающий анализ научных работ той области знания, к которой относится данная проблема. Далее в логике научного исследования важным представляется определение объекта и предмета исследования. При этом важно обратить внимание на то, что объект исследования непосредственно связан и детерминируется специальностью исследователя. Например, конструктивная система здания может быть объектом исследования конструктора, элементы фасадного декора этого же здания – задача, решаемая искусствоведом, а объемно-планировочная структура исследуется архитектором, это же здание как элемент композиционно-пространственной системы города – задача, решаемая градостроителем. **В связи с этим важной составляющей научно-исследовательской деятельности является формулировка темы и задач исследования.** На первый взгляд кажется, что тема должна формулироваться в самом начале исследования. Однако в реальности в ряде случаев тема может уточняться после определения объекта и предмета исследования. Методологическим правилом при этом можно считать следующее: в теме исследования должен быть обязательно определен предмет исследования, но в формулировке темы должен быть обозначен также и объект исследования. Объект шире предмета исследования. С этой точки зрения сформулированная проблема исследования снимает вопрос о том, какая именно часть должна быть объектом, а какая – предметом научного исследования [4, с. 19–21].

Обратим внимание на то, что предмет исследования является составной частью объекта, определенным аспектом его анализа, одной или несколькими его сторонами. Это может быть точка зрения, с которой исследователь, познавая целостный объект, выделяет наиболее существенные свойства, признаки, отношения, характеризующие объект. При этом важно понимать, что предмет исследования, так же как и объект, детерминируется научной специальностью. В связи с этим, определяя предмет, исследователь должен соотносить его с областью исследований, зафиксированной в паспорте научных специальностей [6, с. 41].

С учетом объекта и предмета определяется цель исследования. Цель – это то, что необходимо решить в результате исследования. Решение поставленной проблемы является логически верной формулировкой цели исследования.

Исходя из цели определяются и формулируются задачи научного исследования. Важно также уяснить, каковы **критерии оценки достоверности результатов научно-исследовательской деятельности, которые** выработаны многолетним опытом. Они распространяются на любые отрасли научного знания. К таким критериям относятся: предметность, полнота, непротиворечивость, интерпретируемость, проверяемость [4].

Предметность является одним из главных критериев достоверности теоретических построений исследования и означает, что вся совокупность понятий и утверждений относится к одной и той же предметной области. Достаточно простой способ выдержать предметность – отслеживать, чтобы заявленный в начале исследования предмет составлял суть содержания исследовательской работы, а результаты должны раскрывать ее.

Полнота как критерий достоверности результатов исследования связана с тем, что они описывают все явления и процессы в данной предметной области в обозначенных границах исследования.

Непротиворечивость результатов исследования означает, что все выявленные в результате исследования факторы, особенности, закономерности, принципы, модели, условия формирования и развития предмета по отношению друг к другу не должны быть логически противоречивыми.

Особое внимание важно обратить на то, что любая научно-исследовательская деятельность связана с применением тех или иных методов. Существует целая отрасль познания, которая намеренно занимается исследованием методов, которую принято называть методологией. Методология дословно означает «учение о методах», происходит этот термин от двух греческих слов: «методос» – метод и «логос» – учение.

В общем плане методологию можно определить как учение о структуре и логике организации, методах и средствах научно-исследовательской деятельности. В прикладном смысле методология – это система принципов и подходов исследовательской деятельности, на которые опирается исследователь в ходе получения и разработки знаний в рамках конкретного научного направления. Составной частью методологии является философия науки как совокупность теоретических проблем науки и их истолкование.

В связи с этим отметим, что философия по отношению к науке выполняет методологическую функцию познания и мировоззренческой интерпретации результатов научно-исследовательской деятельности.

Заметим при этом, что различные философские направления по-разному относятся к науке и принятым ею способам построения знания. Некоторые настроены к науке скептически, а иногда даже враждебно, другие пытаются растворить философию в науке, игнорируя тем самым мировоззренческие функции философии. Однако знаменитые ученые всех времен, определившие главные направления развития науки, не только имели выдающиеся научные достижения, но и существенным образом повлияли на мировоззрение и стиль мышления своего времени.

Овладеть существующей методологией необходимо потому, что далеко не каждый исследователь может создать собственную, оригинальную методологию научного исследования, а использует уже сформировавшиеся и утвердившиеся методологические принципы и подходы.

К основным концептам и понятиям методологии относятся:

- теория (от греч. «theoria» – наблюдение, исследование) – сложное многоаспектное явление, которое включает совокупность обобщенных положений, образующих какую-либо науку или ее раздел;
- обобщение опыта общественной практики, отражающее объективные закономерности развития тех или иных явлений или процессов;
- гипотеза (от греч. «hypothesis» – основание, предположение) – научное предположение, выдвигаемое для объяснения какого-либо явления и требующее проверки на опыте, а также для получения достоверных знаний для обоснования того, чтобы стать достоверной научной теорией;
- научные методы (от греч. «methodos») предмета исследования – упорядоченные способы познания, приводящие к положительному результату [5, с. 33].

Поскольку познание – это творческая деятельность человека, направленная на получение достоверных знаний, поэтому в выборе методов исследования содержится единство объективного и субъективного компонентов.

Объективность метода познания всегда детерминирована содержанием предмета. Поэтому метод нельзя рассматривать как некий механический набор предписаний, «список правил», на основе которых можно будто бы решить любые вопросы, возникающие в познании. Обоснование методов исследования – серьезная исследовательская задача. При этом надо учитывать субъективные факторы, обусловленные тем, что процесс познания связан с конкретным исследователем, индивидом, субъектом, который этот метод творчески применяет. Поэтому любой самый важный метод – это лишь один из многих факторов творческой деятельности человека. Последняя не ограничивается только сферой познания и не сводится лишь к логике и методу. Она включает в себя и такие субъективные характеристики исследователя, как силу и гибкость ума, его критичность, глубину воображения, развитость фантазии, способность к интуиции и т. д.

Методы научного познания принято разграничивать по степени их идентичности, т. е. по широте применяемости в процессе научного исследования. Классификация общенаучных методов связана с понятием уровней научного познания. При этом различают два уровня познания: эмпирический и теоретический [3]. Одни общенаучные методы применяются только на эмпирическом уровне (наблюдение, эксперимент, измерение), другие – только на теоретическом (идеализация, формализация), а некоторые (например, моделирование) – как на эмпирическом, так и на теоретическом уровнях.

Эмпирический уровень научного познания связан с прямым исследованием объективно существующих, чувственно воспринимаемых объектов. Теоретический уровень характеризуется преобладанием рационального компонента познания.

К методам научного исследования относятся: способ сбора, обработки или анализа данных, получаемых в ходе изучения объекта и исследуемого предмета. Поэтому методом является не только действие по упорядочиванию интересующей исследователя информации, но и операция по использованию этой информации в решении конкретных практических задач. Классификация методов научного исследования предполагает, как минимум, четыре основания, которые связаны с областью их применения. Так, в соответствии с классификацией они могут делиться на физические, химические, логико-математические, социальные и др.

Проблема обоснования методов достижения поставленной цели является одной из важнейших задач научного исследования, поскольку именно методы обосновывают программу построения и практического применения различных методологических подходов и методических средств. При этом подчеркнем, что правильно выбранные методы исследования позволяют гораздо быстрее и успешнее решать поставленные научно-исследовательские задачи [6, с. 74–88].

Для примера рассмотрим методы, которые находят применение на эмпирическом уровне научного познания: наблюдение и эксперимент. Так, наблюдение можно определить как подчиненное задачам научного исследования преднамеренное и целенаправленное восприятие явлений и процессов без прямого вмешательства в их течение. Наблюдение в современной науке может быть связано также с обширным применением приборов, которые, во-первых, способствуют усилению органов чувств, а во-вторых, нивелируют элемент субъективизма с оценки наблюдаемых явлений. Важное место в процессе наблюдения занимает операция измерения, которое предполагает определение отношения одной измеряемой величины к другой, принятой за эталон. Различают простое и соучастствующее, то есть включенное

наблюдение. Наряду с этим в некоторых сферах профессиональной деятельности используется и метод интроспекции, то есть самонаблюдения.

Следующий важный метод – эксперимент, который в отличие от наблюдения предполагает исследование в контролируемых и управляемых условиях. Как правило, эксперимент проводится на основе определенной теории или гипотезы, связанной с поставленной задачей и требующей интерпретации результатов ее решения. Положительный момент в использовании этого метода заключается в том, что он дает возможность исследовать явление, образно говоря, в «чистом виде», учитывать различия условий протекания исследуемого явления или процесса, а также неоднократной проверки полученных результатов [6, с. 88–95].

В научно-исследовательской деятельности различают несколько видов эксперимента.

- Простейший – качественный, определяющий наличие или отсутствие определенных теорий явлений или процессов.

- Более сложный – измерительный или количественный, который определяет численные показатели определенных свойств предмета или процесса.

- Мысленный, который в фундаментальных науках является особой разновидностью эксперимента.

- В целях внедрения новых форм социальной организации и оптимизации управления используется также социальный эксперимент, который осуществляется с учетом моральных и правовых норм.

Наблюдение и эксперимент являются источником научно подтвержденных фактов, под которыми понимаются особого рода выводы, фиксирующие эмпирические данные. Эти данные являются фундаментом науки, так как выступают подтверждением или отрицанием научных выводов.

К методам обработки и систематизации знаний эмпирического уровня относятся анализ и синтез. Анализ предполагает мысленное или реальное расчленение предмета или явления на признаки, свойства, отношения и т. д. Так, например, в строительстве того или иного сооружения проводится предпроектный анализ, который предполагает расчленение процесса исследования проектного задания на ряд этапов, являющихся самостоятельными по целям и результатам работы. Этот прием в проектировании называется расширением смыслового поля. В итоге углубленного последовательного и детального анализа различных аспектов исследования появляются различные варианты качественно новых осмысленных подходов и выработанных установок. Ярким примером данного метода в решении задач, например связанных с сопротивлением материалов в строительной механике, в теории упругости и пластичности или в строительных конструкциях, является представление реального здания или сооружения в виде расчетной схемы, а также метода сечений. Анализ может быть подвергнут отечественный и зарубежный опыт проектирования, строительства и эксплуатации любых конкретных типов зданий, сооружений и их комплексов [5, с. 158–159].

Процедурой, противоположной анализу, является синтез – соединение выделенных в ходе анализа сторон предмета в единое целое. Примером этого метода в строительной механике является переход от исследования напряженно-деформированного состояния отдельного стержня в сопротивлении материалов к стержневой системе: раме, ферме, арке и их комбинациям [7, с. 44–46].

В настоящее время в научных исследованиях широко используется творческий потенциал цифровых медиа. Так, наряду с производственными достижениями, например в автомобильной

и судостроительной промышленности, появились новые возможности их использования в решении задач, связанных с разработкой ландшафтных дизайнов. Новые компьютерные технологии создают новые возможности проектирования сложных форм, которые трудно спроектировать и построить с помощью традиционных строительных технологий. Это в свою очередь влияет на поиск и разработку новых типов конструкций. Стало очевидным, что для реализации цифровых свободных поверхностей необходимо техническое владение материалом, так как новые геометрические решения часто открывают путь к исследованию различных материалов.

Эксперименты могут быть натуральными и модельными. Натуральный эксперимент изучает объекты в их естественном состоянии. Модельный модернизирует объекты и позволяет изучить более широкий диапазон изменения объекта. Эксперимент обычно ставят на заключительных стадиях исследования. Он является критерием истинности теорий и гипотез, а во многих случаях и источником новых теоретических представлений.

Оптимизация процесса экспериментального исследования и управление научным поиском осуществляются на основе математической теории эксперимента, что способствует экономии времени и сокращению материальных затрат.

Подводя итог, можно сказать, что реализация научно-исследовательской деятельности предполагает адекватное представление основных этапов исследовательской работы и рациональный выбор средств и методов ее выполнения, основанный на понимании их статуса в системе науки. Это могут быть философские, общенаучные или частнонаучные методы, а также методы, соответствующие определенному уровню познания, включая его теоретический и эмпирический уровни, а также с учетом релевантности их применения на определенных этапах исследования.

Список литературы

1. Комогоров Ю.Н., Сергеев А.П., Тарасов Д.А., Арапова С.П. Методы и средства научных исследований. Екатеринбург: Изд-во Урал ун-та; 2017.
2. Новиков А.М., Новиков Д.А. Методология научного исследования. Москва: Либроком; 2010.
3. Степин В.С., Елсуков А.Н. Методы научного познания. Минск: Вышэйш. школа; 1974.
4. Высоковский А.А., Глазычев В.Л., ред. Стратегия развития научных исследований в области архитектуры и градостроительства: [матер. науч.-метод. семинара]. Москва; 1989.
5. Коренькова С.Ф., Сидоренко Ю.В. Методология научного исследования материалов общестроительного и специального назначения. Международный журнал экспериментального образования. 2015;(10-2):158–159.
6. Крампит А.Г., Крампит Н.Ю. Методология научных исследований. Томск: Изд-во Том. политехн. ун-та; 2008.
7. Яковлев А.В. К методологии градостроительных исследований. В: Градостроительство. Теория и практика. Межвуз. темат. сб. тр. Ленинград: ЛИСИ; 1983, с. 5–10.

References

1. Kolmogorov Yu.N., Sergeev A.P., Tarasov D.A., Arapova S.P. Methods and means of scientific research. Ekaterinburg: Ural University Publishing House; 2017. [In Russian].
2. Novikov A.M., Novikov D.A. Methodology of scientific research. Moscow: Librocom Publ.; 2010. [In Russian].
3. Stepin V.S., Yelsukov A.N. Methods of scientific cognition. Minsk: Vysheishaya Shkola Publ.; 1974. [In Russian].

4. *Vysokovskii A.A., Glazychev V.L.*, eds. Strategy for the development of scientific research in the field of architecture and urban planning: (mater. scientific method. seminar). Moscow; 1989. (In Russian).
5. *Korenkova S.F., Sidorenko Yu.V.* Methodology of scientific research of materials of general construction and special purpose. *Mezhdunarodnyi zhurnal eksperimental'nogo obrazovaniya* = International Journal of Experimental Education. 2015;(10-2):158–159. (In Russian).
6. *Krampit A.G., Krampit N.Yu.* Methodology of scientific research. Tomsk: Publishing House of Tomsk Polytechnic University; 2008. (In Russian).
7. *Yakovlev A.V.* To the methodology of urban planning research. Urban planning. Theory and practice. Inter-university. thematic collection of works. Leningrad: Leningrad Civil Engineering Institute; 1983, pp. 5–10. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Алла Павловна Федоркина, д-р философских наук, профессор, заведующий кафедрой философии АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: fedorkina.alla@mail.ru

Alla P. Fedorkina, Dr. Sci. (Philosophy), Professor, Head of Philosophy Department, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: fedorkina.alla@mail.ru



II Международный строительный конгресс

Наука. Цели. Инновации. Строительство (МСК-2024)

Сайт конгресса
forum-cstroy.ru



АПРЕЛЬ 2024



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



с 1927 года
95
ЛЕТ



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»

ПРИЕМ В АСПИРАНТУРУ НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО» до 30 сентября 2023 года !

Научные специальности:

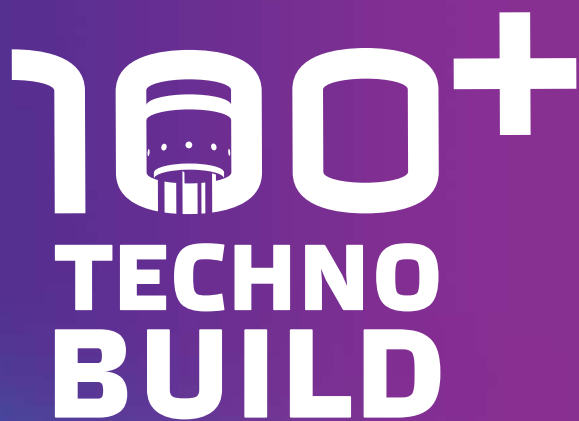
- 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2 «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5 «Строительные материалы и изделия»

Обучение очное - 4 года
Подробнее на сайте cstroy.ru



Наши контакты:

Центр подготовки кадров (глав. корпус, 4 этаж, к. 400 (5)
Моторина Екатерина Сергеевна
+7 (495) 602-00-70 доб. 1172, 8 (916) 307-75-80;



**X Международный
строительный форум
и выставка**

**3-6 ОКТЯБРЯ 2023
ЕКАТЕРИНБУРГ**

forum-100.ru

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»
Вып. 2(37) 2023

Фото обложки:
Купол Екатеринбургского государственного цирка

Редактор выпуска Починина Н.Е.
Компьютерная верстка Чорненький С.И.

Дата выхода в свет: 25.06.2023 г. Формат 70×100/16
Бумага мелованная. Офсетная печать.
Тираж 500 экз. Заказ № 27081

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, 2023