



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИМ. В. А. КУЧЕРЕНКО



НИИОБ
ИМ. А. А. ГОРЗУБОВА



НИИОСП
ИМ. И. И. ПЕРСЯНОВА

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

№ 1(40) 2024

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 1(40) 2024

НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

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

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

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

Учредитель и издатель: АО «НИЦ «Строительство»

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

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





**RESEARCH CENTER
OF CONSTRUCTION**
Joint Stock Company

BULLETIN

of Science and Research Center
of Construction

No. 1(40) 2024

SCIENTIFIC POTENTIAL OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY

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

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

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

Founder and publisher: JSC Research Center of Construction

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

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



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

Научный редактор
СМИРНОВА Любовь Николаевна, канд. техн. наук

БАЖЕНОВ Валентин Георгиевич, академик АИИ,
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 АИИ, 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

PUZBIN 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

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

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

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

Вестник НИЦ «Строительство»
Научный потенциал строительной отрасли
Вып. 1(40) / под ред. А.И. Звездова. –
М.: АО «НИЦ «Строительство», 2024. – 138 с.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI журнала: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI выпуска: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40))

В действующем Перечне ВАК от 20.02.2024 г.
под номером 590.

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору
в сфере связи, информационных технологий
и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Свидетельство о регистрации средства массовой
информации ПИ № ФС77-75188 от 22 февраля 2019 г.
Свидетельство о регистрации средства массовой
информации Эл № ФС77-82129 от 18 октября 2021 г.
Содержит статьи, посвященные актуальным проблемам
и перспективам строительной науки, непосредственно
связанным с решением практических задач.
Для научных работников, инженеров-проектировщиков,
преподавателей, аспирантов.

ISSN 2224-9494 (Print)
ISSN 2782-3938 (Online)
© АО «НИЦ «Строительство»,
«Вестник НИЦ «Строительство», 2024

EDITORIAL BOARD

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

Editor in Chief

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

Scientific Editor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Bulletin of Science and Research Center of Construction
Scientific potential of the construction industry**
Issue 1[40] / edited by A.I. Zvezdov. –
M.: JSC Research Center of Construction, 2024. – 138 p.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI journal <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI issue [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\[40\]](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1[40])
**In the current version of List of HAC from February 20, 2024
our journal has a number 590.**

Registered by the Federal Service for Supervision
of Communications and Information Technologies and mass
communications (ROSKOMNADZOR).
Mass media registration certificate PI No. FS77-75188
dated February 22, 2019.
Mass media registration certificate EI No. FS77-82129
dated October 18, 2021.
Publishes research articles on current problems and
prospects of construction science, directly related to the
solution of practical tasks. For scientists, engineers,
teachers, postgraduate students.

ISSN 2224-9494 (Print)
ISSN 2782-3938 (Online)
© JSC Research Center of Construction, Bulletin of Science
and Research Center of Construction, 2024

Содержание

Строительные конструкции, здания и сооружения

Барагунова Л.А., Шогенова М.М., Шогенов О.М., Яфаунов Э.А.

Свободные колебания балок переменного сечения при учете сил вращения и сил трения 7

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

Разработка методов испытаний огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации 21

Низомов Д.Н., Сангинов А.М., Саломзода М.М.

Численное моделирование динамической задачи обобщенной системы с распределенными параметрами 35

Пуцев Д.И., Мишина С.Ю., Groшев Ю.М.

Обоснование мероприятий по обеспечению необходимых пределов огнестойкости ограждающих конструкций помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара 49

Туснина В.М., Емельянов А.А., Емельянов Д.А.

Влияние инсоляционного нагрева кровли на эксплуатационную надежность покрытия 61

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Харичкин А.И., Бабич Д.Д., Галимов И.М., Чернятин Д.В.

Влияние параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями на основе трубчатых винтовых штанг на их несущую способность и прочностные характеристики 70

Харичкин А.И., Чернятин Д.В., Галимов И.М., Бабич Д.Д.

Влияние конфигурации нагелей в группе на устойчивость закрепляемого грунтового массива 80

Строительные материалы и изделия

Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А., Дондуков В.Г., Селютин Н.М.

Модифицированные бетоны: реальность и перспективы 92

Степанова В.Ф., Спивак Н.А., Королева Е.Н.

Влияние степени коррозионного поражения арматуры на совместную работу с бетоном 105

Отечественная история

Калиниченко А.Л.

Чудо-клей, заменивший дефицитный металл 117

Contents

Building constructions, buildings and structures

Baragunova L.A., Shogenova M.M., Shogenov O.M., Yafaunov E.A.

Free vibrations of variable-section beams taking rotational and frictional forces into account ... 7

Komarova M.A., Grishin I.A., Shalabin M.V., Melnikov N.O.

Development of test methods for fire-retardant coatings of steel engineering structures during operation 21

Nizomov D.N., Sanginov A.M., Salomzoda M.M.

Numerical simulation of the dynamic problem of a generalized system with distributed parameters 35

Putsev D.I., Mishina S.Yu., Groshev Yu.M.

Justification of measures aimed at ensuring the required fire resistance of structures enclosing NPP premises using CFD fire modeling 49

Tusnina V.M., Emelyanov A.A., Emelyanov D.A.

Effect of insolation heating of roof coverings on their performance reliability 61

Foundations, underground structures

Kharichkin A.I., Babich D.D., Galimov I.M., Chernyatin D.V.

Influence of load parameters during landslide slope reinforcement with soil nails based on self-drilling hollow steel bars on their bearing capacity and strength properties 70

Kharichkin A.I., Chernyatin D.V., Galimov I.M., Babich D.D.

Influence of dowel group configuration on the stability of reinforced slopes 80

Building materials and products

Kaprielov S.S., Sheynfeld A.V., Chilin I.A., Dondukov V.G., Selyutin N.M.

Modified concrete: reality and prospects 92

Stepanova V.F., Spivak N.A., Koroleva E.N.

Effect of the degree of corrosion damage in reinforcing bars on composite action with concrete 105

Domestic history

Kalinichenko A.L.

A wonder adhesive for replacing the scarce metal 117

УДК 534.1

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-7-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-7-20)

EDN: ASUWBY

СВОБОДНЫЕ КОЛЕБАНИЯ БАЛОК ПЕРЕМЕННОГО СЕЧЕНИЯ ПРИ УЧЕТЕ СИЛ ВРАЩЕНИЯ И СИЛ ТРЕНИЯ

Л.А. БАРАГУНОВА✉

М.М. ШОГЕНОВА, канд. ф.-м. наук

О.М. ШОГЕНОВ, канд. техн. наук

Э.А. ЯФАУНОВ

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

Аннотация

Введение. В настоящее время в строительстве широко используются балки в качестве несущих конструкций мостов, эстакад, покрытий, перекрытий, лестниц, площадок под оборудование и т.д. Для полного использования несущей способности конструкции и уменьшения расхода материала применяют балки переменного сечения по длине. При эксплуатации такие элементы конструкции подвергаются различным видам колебаний. Возникает необходимость рассмотрения вопросов колебательного движения.

Цель настоящей статьи состоит в применении численных методов при исследовании влияния инерционных сил вращения и при наличии сил вязкого трения на свободные колебания балок переменного сечения, которые приводят к определенным трудностям. Эта область исследования, несомненно, представляет большой интерес, так как расчеты прямо связаны с определением частот и форм собственных колебаний конструкций.

Материалы и методы. Свободные колебания описываются однородным дифференциальным уравнением в частных производных гиперболического типа. Используются методы разделения переменных, конечных разностей. Вводятся дискретная область в виде множества узлов равномерной сетки и однородная система алгебраических уравнений. Используется система уравнений в матрично-векторной форме.

Результаты. Определяются спектры собственных частот, коэффициенты затухания и собственные формы колебаний балки. Показано, что матрица коэффициентов является ленточной и пятидиагональной. Элементы матрицы являются функциями характеристического показателя. Коэффициент затухания и частота свободных колебаний определяются из системы двух нелинейных уравнений. Решение системы уравнений находится с помощью метода покоординатного спуска. Рассмотрен пример расчета балки из сварного двутавра. Вычислены пять элементов спектров коэффициентов затухания и собственных частот.

Выводы. Использование современных вычислительных комплексов MATLAB позволяет сочетать численные и графические способы. В решенных примерах удачно применены достоинства этих способов для определения собственных значений матриц и собственных функций, продемонстрирована надежность и высокая точность полученных результатов, позволяющая простым и универсальным способом определять характеристики свободных колебаний балок переменного сечения.

Ключевые слова: балки переменного сечения, свободные колебания, численные методы, спектры собственных частот, собственные формы колебаний, программная система MATLAB

Для цитирования: Барагунова Л.А., Шогенова М.М., Шогенов О.М., Яфаунов Э.А. Свободные колебания балок переменного сечения при учете сил вращения и сил трения. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):7–20. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-7-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-7-20)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 18.01.2024

Поступила после рецензирования 12.02.2024

Принята к публикации 14.02.2024

FREE VIBRATIONS OF VARIABLE-SECTION BEAMS TAKING ROTATIONAL AND FRICTIONAL FORCES INTO ACCOUNT

L.A. BARAGUNOVA 

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

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

E.A. YAFANOV

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

Abstract

Introduction. Beams are widely used in the construction industry as load-bearing structures of bridges, overpasses, coverings, slabs, stairs, equipment platforms, etc. In order to fully utilize the bearing capacity of such structures and to reduce the rate of material consumption, beams of variable cross-section along the length can be used. During operation, such structural elements are subjected to various types of vibrations, which determines the relevance of studying various aspects of vibrational motion.

Aim. To apply numerical methods for studying the influence of rotational inertial forces in the presence of viscous frictional forces on free vibrations of variable-section beams. This area of research presents interest, since the calculations are directly related to the determination of frequencies and forms of natural vibrations of structures.

Materials and methods. Free vibrations were described by a homogeneous partial differential equation of hyperbolic type. The methods of variable separation and finite differences were used. A discrete domain in the form of a set of uniform grid nodes and a homogeneous system of algebraic equations were introduced. The system of equations in the matrix-vector form was used.

Results. The spectra of natural frequencies, damping coefficients, and eigenforms of beam vibrations are determined. It is shown that the coefficient matrix has a banded and pentadiagonal form. The matrix elements are functions of the characteristic index. The damping coefficient and the frequency of free vibrations are determined from a system of two nonlinear equations. The solution of the system of equations is found using the method of coordinate descent. An example of calculation of a welded I-beam is considered. Five elements of the spectra of damping coefficients and natural frequencies are calculated.

Conclusions. State-of-the-art MATLAB solvers allows numerical and graphical methods to be combined. In the solved examples, the advantages of these methods were successfully applied to determine the eigenvalues of matrices and eigenfunctions. The high validity and accuracy of the results obtained confirm the simplicity and versatility of the methodology for determining the characteristics of free vibrations of beams of variable cross-section.

Keywords: free vibrations, beams of variable section, numerical methods, spectra of natural frequencies, eigenvibrations, MATLAB

For citation: Baragunova L.A., Shogenova M.M., Shogenov O.M., Yafaunov E.A. Free vibrations of variable-section beams taking rotational and frictional forces into account. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):7–20. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-7-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-7-20)

Author contribution statements

All the authors have contributed equally to the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 18.01.2024

Revised 12.02.2024

Accepted 14.02.2024

Введение

Во многих случаях изучение колебаний балок существенно усложняется по разным причинам: материал балки неоднородный, поперечное сечение переменное вдоль оси, балка несет неравномерно распределенную массу и т. д. [1–3]. В таких задачах применение аналитических методов, например при определении собственных значений, амплитудно-частотных характеристик, встречает серьезные затруднения. Выход из них состоит в использовании численных методов, область применения которых все время расширяется и охватывает новые задачи [4–6].

Свободные колебания

Свободные колебания балки при наличии вязкого трения и с учетом инерции вращения описываются однородным дифференциальным уравнением в частных производных гиперболического типа [7–9], которое для балки переменного сечения из однородного материала примет вид*

$$\begin{aligned} (Bu''')'' - Pu'' - rü'' + m\ddot{u} + \varepsilon m\dot{u} &= 0, \\ (x, t) \in Q \equiv [(x, t): x \in L \equiv (0, l), t > 0], \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$B(x) = EJ(x), \quad r(x) = \rho J(x), \quad m(x) = \rho F(x),$$

P – осевая растягивающая сила;

E, ρ – модуль упругости и плотность материала;

F, J – площадь и осевой момент инерции поперечного сечения балки;

ε – коэффициент удельного линейно-вязкого трения.

* В данной модели колебаний деформации сдвига не учитываются.

Точки соответствуют дифференцированию по времени t , штрихи – по пространственной координате x .

В уравнении (1) в порядке следования слагаемых учтены силы упругости, осевая сила, силы инерции вращения, инерционная сила линейных перемещений, силы линейно-вязкого трения [10–12].

Зададимся дальнейшей целью определить спектры собственных частот, коэффициентов затухания и собственных форм колебаний балки. Возьмем наиболее типичный случай шарнирно опертой однопролетной балки, для которой граничные условия представляются в виде

$$u(0,t) = u''(0,t) = u(1,t) = u''(1,t). \tag{2}$$

Решение задачи (1), (2) отыскивается с помощью метода разделения переменных как произведение

$$u(x,t) = X(x)e^{\lambda t}. \tag{3}$$

Здесь характеристический показатель

$$\lambda = -\mu + j\omega, \tag{4}$$

где j – мнимая единица;

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

Подстановка (3) в (1), (2) дает

$$(BX''') - PX'' - r\lambda^2 X'' + (m\lambda^2 + \varepsilon m\lambda)X, \tag{5}$$

$$X(0) = X''(0) = X(1) = X''(1) = 0. \tag{6}$$

Введем обозначения

$$g(x) = P + r\lambda^2, \quad s(x) = m\lambda^2 + \varepsilon m\lambda$$

и перепишем уравнение (5)

$$(BX''')'' - gX'' + sX = 0. \tag{7}$$

Далее воспользуемся методом конечных разностей. С этой целью вместо области $L + \Gamma$ (Γ – граничные точки) введем дискретную область l_h в виде множества узлов равномерной сетки с шагом h

$$l_h \equiv [x_i; x_i = (i-1)h, \quad i = 1, 2, \dots, n, N; N = n + 1], \quad h = l/n,$$

где N – количество узлов сетки.

Значения функций и производных в уравнении (7) заменим приближенными или точными (если возможно)

$$X(x_i) \approx y_i, \quad X''(x_i) \approx \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2}, \quad g(x_i) = g_i, \quad s(x_i) = s_i$$

и получим на первом этапе равенство

$$\frac{(BX'')_{i-1} - 2(BX'')_i + (BX'')_{i+1}}{h^2} - g_i \frac{y_{i-1} - 2y_i + y_{i+1}}{h^2} + s_i y_i = 0. \quad (8)$$

Повторное применение процедуры замены второй производной конечноразностными соотношениями и приведение подобных членов дает однородную систему алгебраических уравнений

$$a_i y_{i-2} - b_i y_{i-1} + c_i y_i - d_i y_{i+1} + e_i y_{i+2} = 0, \quad i = 4, 5, \dots, n-2, \quad (9)$$

где

$$\begin{aligned} a_i &= B_{i-1}, & b_i &= 2B_{i-1} + 2B_i + g_i h^2, & c_i &= B_{i-1} + 4B_i + B_{i+1} + 2g_i h^2 + s_i h^4, \\ d_i &= 2B_i + 2B_{i+1} + g_i h^2, & e_i &= B_{i+1}. \end{aligned}$$

Аналогичные замены проведем в граничных условиях (6), воспользуемся уравнением (9) для точек $i = 2, 3, n-1, n$ и получим четыре уравнения

$$\begin{aligned} q_2 y_2 - d_2 y_3 + e_2 y_4 &= 0, & -b_3 y_2 + c_3 y_3 - d_3 y_4 + e_3 y_5 &= 0, \\ a_{n-1} y_{n-3} - b_{n-1} y_{n-2} + c_{n-1} y_{n-1} - d_{n-1} y_n &= 0, & a_n y_{n-2} - b_n y_{n-1} + p_n y_n &= 0. \end{aligned}$$

Здесь обозначено

$$q_2 = c_2 - a_2, \quad p_n = c_n - e_n.$$

Появляющиеся при этом значения функции во внесеточных узлах y_0, y_{n+2} выражаются через значения функции в узлах сетки. Так, например, использование граничного условия на левом конце

$$X''(0) = 0$$

при $i = 1$ приводит к соотношению

$$\frac{y_0 - 2y_1 + y_2}{h^2} = 0,$$

из которого при $y_1 = 0$ легко получается, что

$$y_0 = -y_2.$$

Аналогично граничные условия на правом конце дают

$$y_{n+2} = -y_n.$$

Исключим с помощью данных соотношений y_0 и y_{n+2} из числа компонентов вектора y , а также равные нулю y_1 и y_n и получим вектор $y^T = \{y_2, y_3, \dots, y_{n-1}, y_n\}$, компонентами которого являются отклонения балки. Тогда систему уравнений можно переписать в матрично-векторной форме

$$\mathbf{G}(\lambda) \mathbf{y} = \mathbf{0}, \quad (10)$$

современных вычислительных компьютерных программных систем типа MATLAB при этом позволяет весьма удачно сочетать достоинства как численных, так и графических способов.

Решение системы уравнений найдем с помощью метода покоординатного спуска [16–18]. С этой целью образуем вспомогательную неотрицательную функцию

$$\Phi(\mu, \omega) = |\det(\mu, \omega)| = [f_1^2(\mu, \omega) + f_2^2(\mu, \omega)]^{1/2},$$

обращающуюся в нуль лишь в том случае, если

$$f_1(\mu, \omega) = f_2(\mu, \omega) = 0.$$

Таким образом, решение исходной системы (12) будет одновременно точкой нулевого минимума скалярной функции векторного аргумента $\Phi(\mu, \omega)$, так что теперь необходимо решать более простую задачу

$$\Phi(z) = 0, \quad z = \{\mu, \omega\} \in R^2 \cap (\mu > 0, \omega > 0).$$

Здесь вектор z соответствует искомым величинам, $\Phi(z)$ представляет мультимодальную функцию, имеющую множество локальных минимумов.

Суть применяемого метода состоит в построении последовательности точек (приближений к решению) $z_k, k = 0, 1, \dots$, сходящейся к точке локального минимума z^* . При этом в процессе вычислений необходимо добиваться, чтобы значения вспомогательной функции были монотонно убывающими и ограниченными снизу

$$\Phi(z_0) \geq \Phi(z_1) \geq \dots \geq \Phi(z_k) \geq \dots \geq \Phi(z^*). \quad (13)$$

Для реализации такой цели вначале с помощью численных экспериментов намечается начальная точка последовательности z_0 . Затем определяются последующие приближения z_k с помощью соотношений

$$z_{k+1} = z_k + \Delta_k,$$

где Δ_k – вектор приращений координат, обеспечивающий выполнение условий (13).

Условием прекращения вычислительной процедуры, а значит, и признаком достижения корня с необходимой точностью служит выполнение неравенства

$$\Phi(z_{k+1}) < \delta, \quad (14)$$

причем δ – априорно задаваемое малое положительное число (точность вычислений).

Многokратное повторение такой процедуры вычислений дает спектры коэффициентов затухания и собственных частот

$$\{(\mu_1, \omega_1), (\mu_2, \omega_2), \dots\}.$$

При реализации предлагаемой численной схемы наибольшая сложность состоит в правильном выборе приращений координат $\Delta = \{\Delta\mu, \Delta\omega\}$ на каждом шаге по величине и по знаку. В этом месте обычные подходы к составлению компьютерных программ вычислений требуют высокого программистского искусства, а сами программы получаются сложными и громоздкими. Трудности существенно упрощаются, если используемая система программирования позволяет оперативно визуализировать результаты вычислений. Поясним сказанное на примере данной задачи при пользовании программной системой MATLAB.

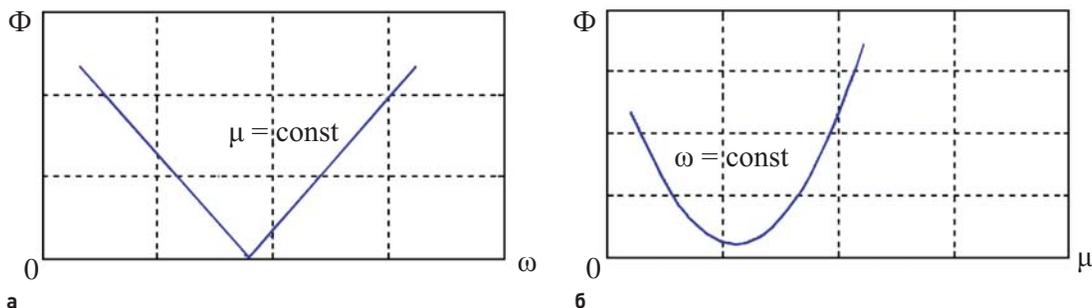


Рис. 1. Графики, полученные программной системой MATLAB
 Fig. 1. Graphs obtained by the MATLAB toolbox

Один из аргументов функции $\Phi(\mu, \omega)$, например μ , фиксируется, вычисляются ординаты функции $\Phi(\omega | \mu)$, на экран компьютера выводится ее график (рис. 1а), вычисления приостанавливаются. По кривой, являющейся сечением поверхности $\Phi(\mu, \omega)$, отчетливо видны условные минимумы функции $\Phi(\omega | \mu)$. Теперь фиксируем аргумент ω на значении, соответствующем условному минимуму и строим новый график $\Phi(\mu | \omega)$ (рис. 1б) и т. д. Такая процедура продолжается до выполнения условия (14).

Пример 1. В качестве тестовой проверки рассмотрим балку постоянного сечения из двутавра № 14 с численными данными

$$l = 4 \text{ м}, n = 400, \rho = 7800 \text{ кг/м}^3, E = 200 \text{ ГПа}, F = 17,4 \text{ см}^2, J = 572 \text{ см}^4, \varepsilon = 0,01 \text{ с}^{-1}, P = 0.$$

По процедуре, описанной выше, определены пять элементов спектра собственных частот. Их значения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Элементы спектра собственных частот

Table 1

Elements of the spectrum of eigenfrequencies

k	1	2	3	7	10
$\mu_k, \text{с}^{-1}$	0,00499	0,00496	0,00491	0,00455	0,00416
$\omega_k, \text{с}^{-1}$	178,91	713,46	1597,23	8367,43	16321,99

В табл. 2 показаны значения пяти элементов спектра собственных частот для балки с такими же численными данными при $P = -0,25P_c$ (P_c – критическая эйлерова сила).

Таблица 2

Элементы спектра собственных частот при $P = -0,25P_c$

Table 2

Elements of the spectrum of eigenfrequencies at $P = -0,25P_c$

k	1	2	3	7	10
$\mu_k, \text{с}^{-1}$	0,00499	0,00496	0,00491	0,00455	0,00416
$\omega_k, \text{с}^{-1}$	154,94	690,80	1574,88	8346,05	16301,57

Примечательно, что для получения результатов требуется небольшое количество шагов в методе покоординатного спуска (4–5 для каждого k).

Тот же спектр (при $P = 0$), полученный точными аналитическими методами, приведен в табл. 3.

Ниже в табл. 4 показана разница между собственными частотами колебаний балки, полученными точными аналитическими методами и методом конечных разностей.

Таблица 3

Элементы спектра собственных частот при $P = 0$

Table 3

Elements of the spectrum of eigenfrequencies at $P = 0$

k	1	2	3	7	10
μ_k, c^{-1}	0,00499	0,00496	0,00491	0,00455	0,00416
ω_k, c^{-1}	178,91	713,47	1597,3	8369,44	16329,7

Таблица 4

Разница между собственными частотами колебаний балки

Table 4

Difference between eigenfrequencies of beam vibrations

k	1	2	3	7	10
Разница, %	0	0,001	0,004	0,024	0,047

Видно, что разница небольшая, не имеющая практической значимости.

Результаты данного примера убедительно показывают, что метод конечных разностей дает надежные результаты, позволяющие универсальным и простым способом определять динамические характеристики свободных колебаний балок переменного сечения [19–20].

Спектр собственных форм может быть установлен с помощью системы уравнений (10). Ввиду того, что определитель матрицы G равен нулю, собственные формы могут быть найдены лишь с точностью до сомножителя. Тогда в (10) можно принять, например, что $y_2 = 1$, и остальные неизвестные найти из системы уравнений, из которой исключена последняя строка (см. на стр. 16).

Заметим, что правая часть системы уравнений образована из элементов первого столбца матрицы G .

Пример 2. По данным примера 1 вычислим ординаты трех первых собственных форм $\varphi_k(x) = y_k(x)$.

Результаты счета в виде графиков показаны на рис. 2. Номера кривых при этом совпадают с номерами собственных частот; проведена нормировка форм, удовлетворяющая условию

$$\max_i |y_i| = 1.$$

Данные кривые почти неразличимо совпадают с собственными формами, найденными с помощью точных аналитических методов.

Таблица 5

Элементы спектров коэффициентов затухания и собственных частот

Table 5

Elements of spectra of damping coefficients and eigenfrequencies

<i>k</i>	1	2	3	4	5
μ_k, c^{-1}	0,00494	0,00474	0,00440	0,00396	0,00354
ω_k, c^{-1}	526,02	1913,70	4209,43	7332,23	10761,67

Таблица 6

**Элементы спектров коэффициентов затухания и собственных частот
для классической модели**

Table 6

Elements of spectra of damping coefficients and eigenfrequencies for a classical model

<i>k</i>	1	2	3	4	5
μ_k, c^{-1}	0,005	0,005	0,005	0,005	0,005
ω_k, c^{-1}	530,69	1971,84	4494,04	8247,98	12782,02

Таблица 7

Разница между собственными частотами балки по двум моделям

Table 7

Difference between eigenfrequencies of the beam according to two models

<i>k</i>	1	2	3	7	10
Разница, %	0,88	2,95	6,33	11,10	15,81

Заключение

1. Метод конечных разностей дает надежные результаты, позволяющие универсальным и простым способом определять динамические характеристики свободных колебаний балок переменного сечения.

2. Задача о колебаниях балки переменного сечения, представленная в статье, решена эффективно с помощью численного метода конечных разностей.

3. Основное обыкновенное дифференциальное уравнение колебаний балки и уравнения граничных условий решаются легко, с помощью численного метода конечных разностей.

4. Решение основных аналитических уравнений приводит к однородной алгебраической системе уравнений в матрично-векторной форме, что существенно облегчает достижение конечных целей.

Список литературы

1. Ильин В.П., Карпов В.В., Масленников А.М. Численные методы решения задач строительной механики. Москва: Изд-во АСВ, СПб.: СПбГАСУ; 2005.
2. Караманский Т.Д. Численные методы строительной механики. Москва: Стройиздат; 1981.
3. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. Москва: Наука; 1989.
4. Формалев В.Ф., Ревизников Д.Л. Численные методы. Изд. 2-е. Москва: Физматлит; 2006.
5. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. Москва: Высшая школа; 1979.
6. Масленников А.М. Динамика и устойчивость сооружений. Москва: Юрайт; 2016.
7. Kulterbayev Kh.P., Shogenova M.M., Baragunova L.A. On the Influence of the Characteristic Frequency and Broadband of Seismic Effects on the Vertical Rod Oscillations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;753(4):042040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/4/042040>
8. Барагунов Т.М. Об устойчивости многопролетных стержней на гибких опорах. В: Восьмые Окуневские чтения: материалы докладов международной конференции, 25–28 июня 2013 г., г. Санкт-Петербург, Россия. СПб.: Балтийский гос. технический ун-т; 2013, с. 72–74.
9. Культербаев Х.П., Барагунова Л.А. О реализации проблемы собственных значений сжато-растянутого стержня на компьютере. В: Компьютерные технологии в строительстве: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Махачкала: Алеф (ИП Овчинников); 2013, с. 90–94.
10. Культербаев Х.П., Барагунова Л.А. О плотности собственных значений в задаче об устойчивости многопролетного стержня. В: Строительство: Проблемы и перспективы. Сборник статей по материалам международной научно-практической конференции. Махачкала: Дагестанский государственный институт народного хозяйства; 2013, с. 133–135.
11. Культербаев Х.П., Чеченов Т.Ю., Барагунов Т.М. Вынужденные колебания континуально-дискретной многопролетной балки при учете инерционных сил вращения. Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2012;26:48–55.
12. Чеченов Т.Ю. Кинематически возбуждаемые колебания модифицированной балки Тимошенко. В: Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций и оснований фундаментов. Материалы IV Международной научно-технической конференции (12–14 мая 2005 г.). Ч. II. Волгоград; 2005, с. 36–41.
13. Kulterbayev Kh.P., Baragunova L.A., Lafisheva M.M. Determining Frequencies of Free Longitudinal Vibrations of Rods by Analytical and Numerical Methods. In: Alikhanov A., Lyakhov P., Samoilenko I. Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems. APAMCS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 702. Springer Nature Switzerland; 2023, pp. 131–136. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34127-4_13
14. Культербаев Х.П., Барагунова Л.А. Определение собственных значений и собственных функций в задаче о колебаниях балки переменного сечения. В: Строительство и архитектура: теория и практика сейсмической безопасности. Сборник научных статей по итогам деятельности международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Абакарова А.Д. (14–16 марта 2023 г., г. Махачкала). Махачкала; 2023, с. 131–142.
15. Культербаев Х.П., Лафишева М.М., Цеева Ф.М. Вынужденные гармонические и случайные продольные колебания вертикального стержня. В: Строительство и архитектура: теория и практика сейсмической безопасности. Сборник научных статей по итогам деятельности международной научно-практической конференции, посвященной памяти д.т.н., профессора Абакарова А.Д. (14–16 марта 2023 г., г. Махачкала). Махачкала; 2023, с. 170–177.
16. Казиев А.М., Казиев И.А. Колебания балки с сосредоточенными массами на упругих опорах. В: Наука, техника и технология XXI века (НТТ-2013). Материалы V Международной научно-технической конференции (Нальчик, 2013 г.). Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет; 2013.
17. Казиев А.М. Свободные колебания растянутой балки с сосредоточенными массами. В: Перспектива-2004. Материалы Всероссийской научной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых. Т. III. Нальчик; 2004. с. 251–255.
18. Культербаев Х.П., Джанкулаев А.Я. Введение в MATLAB. Нальчик: КБГУ; 2006.
19. Барагунова Л.А., Кертбиев А.А. Расчет балок методом конечных разностей. В: Фундаментальные и прикладные научные исследования: актуальные вопросы современной науки, достижения и инновации. Сборник научных статей по материалам IX Международной научно-практической конференции (8 ноября 2022 г., г. Уфа). Уфа: Изд. НИЦ Вестник науки; 2022, с. 378–385.
20. Kulterbaev Kh.P., Vodakhova L.A., Baragunova L.A., Shogenova M.M., Tsipinova A.Kh. Free oscillations of a beam with installation (1st part). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1083(1):012043. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1083/1/012043>

References

1. *Ilyin V.P., Karpov V.V., Maslennikov A.M.* Numerical methods for solving problems of structural mechanics. Moscow: ASB Publ., St. Petersburg: St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering; 2005. (In Russian).
2. *Karamansky T.D.* Numerical methods of structural mechanics. Moscow: Stroizdat Publ.; 1981. (In Russian).
3. *Samarskii A.A., Gulin A.V.* Numerical methods. Moscow: Nauka Publ.; 1989. (In Russian).
4. *Formalev V.F., Revisnikov. D.L.* Numerical methods. 2nd ed. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2006. (In Russian).
5. *Biderman V.L.* Applied theory of mechanical vibrations. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1979. (In Russian).
6. *Maslennikov A.M.* Dynamics and stability of structures. Moscow: Yurait Publ.; 2016. (In Russian).
7. *Kulterbayev Kh.P., Shogenova M.M., Baragunova L.A.* On the Influence of the Characteristic Frequency and Broadband of Seismic Effects on the Vertical Rod Oscillations. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020;753(4):042040. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/753/4/042040>
8. *Baragunov T.M.* On the stability of multi-span rods on flexible supports. In: The eighth Okunev readings: proceedings of the reports of the international conference, June 25–28, 2013, St. Petersburg, Russia. St. Petersburg: Baltic State Technical University; 2013, pp. 72–74. (In Russian).
9. *Kulterbaev H.P., Baragunova L.A.* On the implementation of the problem of eigenvalues of a compressed-stretched rod on a computer. In: Computer technologies in construction: Materials of the All-Russian Scientific and Technical Conference. Makhachkala: Alef (IP Ovchinnikov); 2013, pp. 90–94. (In Russian).
10. *Kulterbaev H.P., Baragunova L.A.* On the density of eigenvalues in the stability problem of a multi-span rod. In: Construction: Problems and prospects. Collection of articles based on the materials of the international scientific and practical conference. Makhachkala: Dagestan State Institute of National Economy; 2013, pp. 133–135. (In Russian).
11. *Kulterbaev H.P., Chechenov T.Yu., Baragunov T.M.* Forced oscillations of a continually discrete multi-span beam taking into account inertial forces of rotation. Bulletin of the Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series "Construction and Architecture". 2012;26:48–55. (In Russian).
12. *Chechenov T.Yu.* Kinetically excited oscillations of a modified Timoshenko beam. In: Reliability and durability of building materials, structures and foundations. Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference (May 12–14, 2005). Part II. Volgograd; 2005, pp. 36–41. (In Russian).
13. *Kulterbayev Kh.P., Baragunova L.A., Lafisheva M.M.* Determining Frequencies of Free Longitudinal Vibrations of Rods by Analytical and Numerical Methods. In: *Alikhanov A., Lyakhov P., Samoylenko I.* Current Problems in Applied Mathematics and Computer Science and Systems. APAMCS 2022. Lecture Notes in Networks and Systems, vol. 702. Springer Nature Switzerland; 2023, pp. 131–136. https://doi.org/10.1007/978-3-031-34127-4_13
14. *Kulterbaev H.P., Baragunova L.A.* Determination of eigenvalues and eigenfunctions in the problem of vibrations of a beam of variable cross-section. In: Construction and architecture: theory and practice of seismic safety. Collection of scientific articles based on the results of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor *Abakarov A.D.* (March 14–16, 2023, Makhachkala). Makhachkala; 2023, pp. 131–142. (In Russian).
15. *Kulterbaev H.P., Lafisheva M.M., Tseeva F.M.* Forced harmonic and random longitudinal vibrations of a vertical rod. In: Construction and architecture: theory and practice of seismic safety. Collection of scientific articles based on the results of the international scientific and practical conference dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor *Abakarov A.D.* (March 14–16, 2023, Makhachkala). Makhachkala; 2023, pp. 170–177. (In Russian).
16. *Kaziev A.M., Kaziev I.A.* Vibrations of a beam with concentrated masses on elastic supports of furnaces. In: Science, technology and technology of the XXI century (NTT-2013). Proceedings of the V International Scientific and Technical Conference (Nalchik, 2013). Nalchik: Kabardino-Balkarian State University; 2013. (In Russian).
17. *Kaziev A.M.* Free vibrations of a stretched beam with concentrated masses. In: Perspektiva-2004. Materials of the All-Russian Scientific Conference of students, postgraduates and young scientists. Vol. III. Nalchik; 2004, pp. 251–255. (In Russian).
18. *Kulterbaev H.P., Dzhanukulaev A.Ya.* Introduction to MATLAB. Nalchik: Kabardino-Balkarian State University; 2006. (In Russian).
19. *Baragunova L.A., Kertbiev A.A.* Calculation of beams by the finite difference method. In: Fundamental and applied scientific research: current issues of modern science, achievements and innovations. Collection of scientific articles based on the materials of the IX International Scientific and Practical Conference (November 8, 2022, Ufa). Ufa: Publishing house "NITs Vestnik Nauki"; 2022, pp. 378–385. (In Russian).

20. *Kulterbaev Kh.P., Vodakhova L.A., Baragunova L.A., Shogenova M.M., Tsipinova A.Kh.* Free oscillations of a beam with installation (1st part). IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2021;1083(1):012043. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1083/1/012043>

Информация об авторах / Information about the authors

Лялюс Ададьбиевна Барагунова , старший преподаватель кафедры строительных конструкций и механики Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, Нальчик
e-mail: baragunoval@mail.ru
тел.: +7 (928) 075-62-99

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

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

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

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

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

Эльдар Асланович Яфаунов, студент направления подготовки «Строительство» Кабардино-Балкарского государственного университета им. Х.М. Бербекова, Нальчик
e-mail: shogenova_mar@mail.ru
тел.: +7 (938) 078-06-20

Eldar A. Yafaunov, Student, "Construction" educational program, Kabardino-Balkarian State University named after H.M. Berbekov, Nalchik
e-mail: yafaunov@yandex.ru
tel.: +7 (938) 078-06-20

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 614.841.45

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-21-34](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-21-34)

EDN: CJYXWA

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ СТАЛЬНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

М.А. КОМАРОВА¹, канд. хим. наук

И.А. ГРИШИН¹

М.В. ШАЛАБИН¹

Н.О. МЕЛЬНИКОВ^{1,2,✉}, канд. техн. наук

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

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

Аннотация

Введение. Одной из важнейших проблем в области применения огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций является прогнозирование их срока эксплуатации или сохранение эффективности во времени. В настоящее время отсутствуют нормативные документы в области пожарной безопасности, регламентирующие проведение испытаний огнезащитных покрытий в процессе эксплуатации, а также определение их долговечности (срока службы).

Целью настоящей работы является разработка методов испытаний для определения стойкости к воздействию климатических факторов, сохранности огнезащитных и антикоррозионных свойств огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации.

Материалы и методы. В качестве испытательных образцов для исследования старения огнезащитных покрытий применяются пластины из листовой стали марки 08кп и 08пс по ГОСТ 16523-97 и ГОСТ 9045-93 размером 600 × 600 × 5 мм с нанесенным на нее с лицевой стороны средством огнезащиты.

Результаты. В работе предложены методы испытаний тонкослойных вспучивающихся и конструктивных огнезащитных покрытий в процессе эксплуатации. Методика проведения ускоренных климатических испытаний образцов с тонкослойным вспучивающимся огнезащитным покрытием (огнезащитной краской) соответствует ГОСТ 9.401-2018, так как они по своей сути являются высоконаполненными лакокрасочными материалами. Для конструктивных огнезащитных покрытий разработана новая методика, последовательность и режимы проведения испытаний. Последующая оценка огнезащитных свойств покрытий и их сохранности проводится методами огнезащитной эффективности по ГОСТ Р 53295-99 и методами термического анализа, при которых сравниваются результаты, характеристики и графические зависимости для исходного огнезащитного покрытия и исследуемого образца после старения. Для тонкослойных вспучивающихся покрытий сохранение огнезащитных свойств дополнительно оценивается по коэффициенту вспучивания, а для конструктивных – по изменению теплопроводности.

Выводы. В результате проведенного исследования разработаны методы испытаний огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации. Установлены предельные уровни изменения свойств покрытий. При оценке огнезащитной эффективности после ускоренных климатических испытаний она должна снижаться не более чем на 20%. Для конструктивной огнезащиты допускается увеличение теплопроводности не более чем на 5%. Для тонкослойных покрытий допускается уменьшение среднеарифметического значения коэффициента вспучивания не более чем на 30% от исходного.

Заключение. Разработанные методы использованы при подготовке проекта национального стандарта Российской Федерации «Конструкции стальные строительные с огнезащитными покрытиями. Методы испытаний антикоррозионных свойств и стойкости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации» для обеспечения нормативных требований пожарной безопасности для данных конструкций.

Ключевые слова: конструкции стальные строительные, огнезащитные покрытия, воздействие климатических факторов, огнезащитная эффективность, сохранение огнезащитных свойств

Для цитирования: Комарова М.А., Гришин И.А., Шалабин М.В., Мельников Н.О. Разработка методов испытаний огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):21–34. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-21-34](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-21-34)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 06.02.2024

Поступила после рецензирования 01.03.2024

Принята к публикации 07.03.2024

DEVELOPMENT OF TEST METHODS FOR FIRE-RETARDANT COATINGS OF STEEL ENGINEERING STRUCTURES DURING OPERATION

M.A. KOMAROVA¹, Cand. Sci. (Chem.)

I.A. GRISHIN¹

M.V. SHALABIN¹

N.O. MELNIKOV^{1,2,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

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

² *Russian Chemical-Technological University named after D.I. Mendeleev, Miusskaya square, 9, bld. 1, Moscow, 125047, Russian Federation*

Abstract

Introduction. Prediction of the durability of flame-retardant coatings of steel engineering structures and preservation of their performance during operation remain important research directions. There is a lack of normative documents in the field of fire protection, regulating the process of testing of flame-retardant coatings during operation, as well as determination of their durability (service life).

Aim. To develop test methods for determining the resistance of flame-retardant coatings of steel engineering structures exposed to climatic factors, preservation of their fireproof and anti-corrosion properties during operation.

Materials and methods. Test specimens included 600 x 600 x 5 mm plates made of 08kp and 08ps sheet steel according to State Standard 16523-97 and State Standard 9045-93 with a flame-retardant agent applied on the front side.

Results. Methods for testing thin-layer intumescent and structural flame-retardant coatings during operation are proposed. The methodology of accelerated climatic testing of specimens coated with thin-layer intumescent

flame-retardant coatings (flame-retardant paints) corresponds to State Standard 9.401-2018. These coatings are inherently high-solid paint materials. A new methodology, sequence, and modes of testing are developed for structural flame-retardant coatings. The subsequent assessment of fireproof properties of coatings and their preservation is carried out by the methods of fire protection efficiency according to State Standard R 53295-99 and the methods of thermal analysis. These methods imply comparison of the characteristics of the initial flame-retardant coating and those obtained after sample aging. The preservation of fireproof properties by thin-layer intumescent and structural coatings is additionally evaluated by the intumescence coefficient and the change in thermal conductivity, respectively.

Conclusions. Test methods for flame-retardant coatings of steel engineering structures during operation are developed. Threshold levels of changes in their properties are established. After accelerated climatic tests, fire protection efficiency should not decrease by no more than 20%. For structural fire protection, an increase in thermal conductivity by no more than 5% is permitted. For thin-layer coatings, the arithmetic mean value of the intumescence coefficient should not decrease by no more than 30% of the initial value.

Implications. The developed methods were used in the preparation of a draft national standard of the Russian Federation "Steel engineering structures with fireproof coatings. Test methods for anticorrosion properties and resistance to climatic factors during operation" to ensure regulatory fire safety requirements for these structures.

Keywords: steel engineering structures, flame-retardant coatings, fire protection coatings, climatic factors, fire protection efficiency, preservation of fire protection properties

For citation: Komarova M.A., Grishin I.A., Shalabin M.V., Melnikov N.O. Development of test methods for fire-retardant coatings of steel engineering structures during operation. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):21–34. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-21-34](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-21-34)

Author contribution statements

All the authors have contributed equally to the publication.

Funding

The research was carried out within a contract between JSC Research Center of Construction and FAU "FCS".

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 06.02.2024

Revised 01.03.2024

Accepted 07.03.2024

Введение

Одной из важнейших проблем в области применения огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций является прогнозирование их срока эксплуатации или сохранение эффективности во времени. Срок эксплуатации или долговечность можно определить как способность огнезащитного покрытия противостоять внешним воздействиям, т. е. оставаться неизменным и сохранять эффективность при воздействии окружающей среды и различных неблагоприятных факторов.

Наибольшее распространение для повышения пределов огнестойкости стальных строительных конструкций получили тонкослойные вспучивающиеся краски и штукатурные покрытия [1–8]. В настоящее время отсутствует нормативная база, регламентирующая сроки эксплуатации и замены (реконструкции) огнезащитных покрытий. Нет и системы подтверждения соответствия покрытий заявленным требованиям пожарной безопасности

по истечении срока эксплуатации в зависимости от условий окружающей среды. Это связано также и с недостаточностью данных по старению различного рода огнезащитных покрытий и научно-исследовательских работ в этой области. При этом проводятся исследования, посвященные этому вопросу. Например, в работах [9–15] приводятся результаты исследований по разработке научно-методических подходов к выявлению дефектов огнезащитных покрытий и оценки состояния при эксплуатации, а также результаты исследований огнезащитных покрытий после ускоренного старения по таким показателям, как внешний вид, адгезия, коэффициент вспучивания, химический состав, термоаналитические характеристики и др. В этих работах также описываются методики, по которым происходило ускоренное старение покрытий, но ввиду отсутствия единых методов полученные данные сложно сопоставлять и делать обоснованные заключения по механизмам старения огнезащитных покрытий и давать прогнозы по их срокам службы.

Таким образом, можно отметить, что в настоящее время ощущается недостаточность информации о процессах старения огнезащитных покрытий, а имеющиеся литературные источники зачастую противоречат друг другу либо их данные устарели.

При старении изменяются все свойства покрытий: огнезащитные, физико-химические, механические и др. На определенной стадии эксплуатации покрытие перестает выполнять свои защитные функции и требуется его реновация или замена. Поэтому проблема долговечности имеет не только научно-технический интерес, но и большое экономическое значение [16].

Атмосферное старение огнезащитных покрытий обусловлено комплексным воздействием многих факторов: влажности, кислорода воздуха, переменных температур, солнечной радиации и т. д. Скорость разрушения покрытий в атмосферных условиях примерно в 50 раз больше, чем в помещении. Основной вклад в разрушение огнезащитных покрытий вносят процессы окислительной и гидролитической деструкции, происходящие под влиянием кислорода и содержащейся в воздухе воды, а также фотохимические процессы, инициируемые солнечным светом. Чем выше интенсивность этих факторов, тем с большей разрушительной силой происходит процесс старения.

Наиболее часто встречающийся вид химического разрушения покрытий – окислительная деструкция. Особенно эффективно она протекает в атмосферных условиях. Диффузия и растворимость кислорода в покрытии, наличие в нем реакционноспособных групп – основные факторы, обуславливающие старение покрытий под действием кислорода [17].

Так как натурные испытания занимают длительное время, наиболее целесообразно проводить испытания по ускоренным методикам. Старение покрытий в лабораторных условиях проводят в установках искусственной погоды (климатических камерах) с имитацией воздействия знакопеременных температур и влажности, солнечной радиации и при необходимости химически агрессивной атмосферы.

Также существуют и действуют нормативные документы по ускоренному старению лакокрасочных материалов, такие как национальные и международные стандарты. На взгляд авторов статьи, оптимальными методиками для наиболее точного воспроизведения условий эксплуатации огнезащитных покрытий, из представленных в литературных источниках, являются методики проведения ускоренных климатических испытаний, приведенные в ГОСТ 9.401-2018 [18].

В настоящее время отсутствуют нормативные документы в области пожарной безопасности, регламентирующие подтверждение сохранения свойств огнезащитных покрытий

в процессе эксплуатации, а также определение гарантийного срока их эксплуатации, который, за редкими исключениями, не проверяется производителями, а предполагается исходя из опыта применения такого рода покрытий.

Целью представленной работы является разработка методов испытаний для определения стойкости к воздействию климатических факторов, сохранности огнезащитных и антикоррозионных свойств огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации.

В основу разрабатываемых методов испытаний легли результаты многолетнего опыта проведения научно-исследовательских работ специалистами НЭБ ПБС ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко в области экспертной оценки несоответствий эксплуатируемых огнезащитных покрытий требованиям нормативных документов, обследований их технического состояния, обоснования остаточного ресурса и продления сроков эксплуатации на различных объектах. Также учитывался опыт различных исследований [9–11, 14], существующие методики, как отечественные [19], так и зарубежные [20], и нормативные документы единой системы защиты от коррозии и старения.

Метод проведения ускоренных климатических испытаний

Сущность метода заключается в проведении ускоренных климатических испытаний образцов стальных пластин с нанесенными огнезащитными покрытиями, после чего проводится оценка стойкости огнезащитных покрытий к воздействию климатических факторов, сохранности огнезащитных и антикоррозионных свойств в процессе эксплуатации.

Для проведения испытаний изготавливаются образцы из расчета 1 образец (2 образца для конструктивной огнезащиты) на каждые 5 лет гарантийного срока эксплуатации огнезащитного покрытия и плюс 1 контрольный образец.

В качестве образцов используется стальная пластина из листовой стали марки 08кп и 08пс по ГОСТ 16523-97 [21] и ГОСТ 9045-93 [22] размером $600 \times 600 \times 5$ мм с нанесенным на нее с лицевой стороны средством огнезащиты (огнезащитным покрытием). Допустимые отклонения по ширине и длине стальной пластины не должны превышать ± 5 мм, а по толщине – $\pm 0,5$ мм. Обратная сторона и кромки пластин должны быть окрашены шпатлевкой ЭП-0010 (или другим согласованным лакокрасочным материалом), которая обеспечивает защиту окрашиваемой поверхности в течение всего срока климатических испытаний. Сушку лакокрасочных материалов для защиты обратной стороны и кромок пластин проводят в естественных условиях.

Методика проведения испытаний, оценка результатов ускоренных климатических испытаний образцов стальных пластин с тонкослойным вспучивающимся огнезащитным покрытием (огнезащитной краской) соответствует ГОСТ 9.401-2018 [18], так как они по своей сути являются высоконаполненными лакокрасочными материалами, и старение этих покрытий проходит зачастую по общеизвестным закономерностям. Метод испытаний для них выбирается в зависимости от условий эксплуатации и категорий атмосфер с коррозионной активностью по ГОСТ 9.104-2018 [23] и типов атмосферы по ГОСТ 15150-69 [24].

Визуальный осмотр поверхности тонкослойного вспучивающегося огнезащитного покрытия контрольных образцов на предмет наличия дефектов (вздутий, растрескивания, отслоений и др. дефектов) проводится до и после ускоренных климатических испытаний. При визуальном

осмотре оценивается внешний вид огнезащитного покрытия по п. 9 ГОСТ 9.407-2015 [25], допустимый уровень снижения защитных свойств должен быть А33.

Методика проведения испытаний, оценка результатов ускоренных климатических испытаний образцов стальных пластин с конструктивной огнезащитой (толстослойные напыляемые составы, штукатурки, облицовка плитными, листовыми и другими огнезащитными материалами) соответствует ГОСТ Р 51372-99 [26]. Ускоренное старение таких образцов проводится циклическим методом, подвергая образцы воздействию температуры и влажности. Исходя из эксплуатационных свойств исследуемого материала в качестве контрольного проводится циклическое испытание 207-1 по ГОСТ Р 51369-99 [27].

Режим испытаний, последовательность перемещения и время выдержки образцов в аппаратах в одном цикле для условий эксплуатации УХЛ4 по ГОСТ 9.104-2018 [23] приведены в табл. 1, для условий эксплуатации УХЛ3, УХЛ2 – в табл. 2, УХЛ1 – в табл. 3. Пять циклов испытаний соответствуют одному году эксплуатации конструктивной огнезащиты.

Таблица 1

Режим испытаний, последовательность перемещения и время выдержки образцов в аппаратах в одном цикле для условий эксплуатации УХЛ4 по ГОСТ 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ) [23]

Table 1

Test mode, movement sequence, and exposure time of specimens in apparatuses in one cycle for operating conditions UHL4 according to State Standard 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ) [23]

Испытания	Режимы испытаний		Продолжительность выдержки образцов в одном цикле, мин
	Температура, °С	Относительная влажность, %	
1. Выдержка	70 ± 2	20 ± 3	150
2. Понижение температуры и повышение влажности	30 ± 2	97 ± 3	20
3. Выдержка	30 ± 2	97 ± 3	50
4. Понижение температуры и влажности	10 ± 2	70 ± 3	20
5. Выдержка	10 ± 2	70 ± 3	50
6. Понижение температуры	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	50
7. Выдержка	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	250
8. Повышение температуры	10 ± 2	Не нормируется	30
9. Выдержка	10 ± 2	Не нормируется	50
10. Повышение температуры	70 ± 2	20 ± 3	50
11. Выдержка	70 ± 2	20 ± 3	150
12. Понижение температуры и повышение влажности	30 ± 2	70 ± 3	20
13. Выдержка	30 ± 2	70 ± 3	50
14. Понижение температуры	10 ± 2	70 ± 3	20
15. Выдержка	10 ± 2	70 ± 3	50
16. Понижение температуры	Минус (10 ± 2)	Не нормируется	50
17. Выдержка	Минус (10 ± 2)	Не нормируется	250
18. Повышение температуры	10 ± 2	Не нормируется	30
19. Выдержка	10 ± 2	Не нормируется	50
20. Повышение температуры	70 ± 2	20 ± 3	50
ИТОГО			1440

Таблица 2

Режим испытаний, последовательность перемещения и время выдержки образцов в аппаратах в одном цикле для условий эксплуатации УХЛ2 и УХЛ3 по ГОСТ 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ) [23]

Table 2

Test mode, movement sequence, and exposure time of specimens in apparatuses in one cycle for operating conditions UHL2 and UHL3 according to State Standard 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ) [23]

Испытания	Режимы испытаний		Продолжительность выдержки образцов в одном цикле, мин
	Температура, °С	Относительная влажность, %	
1. Выдержка	70 ± 2	20 ± 3	150
2. Понижение температуры	30 ± 2	97 ± 3	20
3. Орошение образца водой с расходом 1 л/м ² в минуту	30 ± 2	97 ± 3	50
4. Понижение температуры и влажности	5 ± 2	80 ± 3	20
5. Выдержка	5 ± 2	80 ± 3	50
6. Понижение температуры	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	50
7. Выдержка	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	250
8. Повышение температуры	10 ± 2	Не нормируется	20
9. Выдержка	10 ± 2	Не нормируется	50
10. Повышение температуры	70 ± 2	20 ± 3	30
11. Выдержка	70 ± 2	20 ± 3	90
12. Понижение температуры и повышение влажности	30 ± 2	70 ± 3	20
13. Выдержка	30 ± 2	70 ± 3	50
14. Понижение температуры	10 ± 2	70 ± 3	20
15. Выдержка	10 ± 2	70 ± 3	50
16. Понижение температуры	Минус (10 ± 2)	Не нормируется	50
17. Выдержка	Минус (10 ± 2)	Не нормируется	50
18. Понижение температуры	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	50
19. Выдержка	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	250
20. Повышение температуры	10 ± 2	80 ± 3	20
21. Выдержка	10 ± 2	80 ± 3	50
22. Повышение температуры	70 ± 2	20 ± 3	50
ИТОГО			1440

Перед началом испытаний измеряется теплопроводность конструктивной огнезащиты согласно ГОСТ 7076-99 [28]. Контрольное измерение теплопроводности проводится через 25, 50 и 75 циклов. Допускается увеличение теплопроводности состаренных образцов не более чем на 5% относительно результатов испытаний до старения.

После каждого цикла испытаний проводится оценка повреждений конструктивной огнезащиты и оценивается возможность продолжения испытания на климатические воздействия. Допускается изменение цвета, волосяные трещины, сколы материала на глубину не более 2 мм, наличие единичных нитевидных трещин длиной менее 15 см.

Таблица 3

Режим испытаний, последовательность перемещения и время выдержки образцов в аппаратах в одном цикле для условий эксплуатации УХЛ1 по ГОСТ 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ) [23]

Table 3

Test mode, movement sequence, and exposure time of specimens in apparatuses in one cycle for operating conditions UHL1 according to State Standard 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ) [23]

Испытания	Режимы испытаний		Продолжительность выдержки образцов в одном цикле, мин
	Температура, °C	Относительная влажность, %	
1. Выдержка	70 ± 2	20 ± 3	150
2. Понижение температуры и повышение влажности	30 ± 2	97 ± 3	20
3. Орошение образца водой с расходом 1 л/м ² в минуту	30 ± 2	97 ± 3	50
4. Понижение температуры	5 ± 2	97 ± 3	20
5. Выдержка	5 ± 2	97 ± 3	50
6. Понижение температуры	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	50
7. Выдержка	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	120
8. Понижение температуры	Минус (40 ± 2)	Не нормируется	40
9. Выдержка	Минус (40 ± 2)	Не нормируется	90
10. Повышение температуры	10 ± 2	80 ± 3	30
11. Выдержка	10 ± 2	80 ± 3	50
12. Повышение температуры	70 ± 2	20 ± 3	50
13. Выдержка	70 ± 2	20 ± 3	150
14. Понижение температуры	15 ± 3	97 ± 3	20
15. Орошение образца водой с расходом 1 л/м ²	15 ± 2	97 ± 3	50
16. Понижение температуры	5 ± 2	97 ± 3	20
17. Выдержка	5 ± 2	97 ± 3	50
18. Понижение температуры	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	50
19. Выдержка	Минус (20 ± 2)	Не нормируется	250
20. Повышение температуры и влажности	10 ± 2	80 ± 3	30
21. Выдержка	10 ± 2	80 ± 3	50
22. Повышение температуры	70 ± 2	20 ± 3	50
ИТОГО			1440

Старение всех огнезащитных покрытий и тонкослойных вспучивающихся и конструктивных проводят до достижения предполагаемого срока службы (гарантийного срока эксплуатации) с интервалом 5 лет (5, 10, 15 и т. д. лет). При проведении испытаний следует использовать климатические камеры с рабочими объемами, позволяющими разместить исследуемые образцы.

Метод оценки огнезащитной эффективности

Оценка огнезащитной эффективности покрытий контрольных образцов проводится по п. 6 ГОСТ Р 53295-2009 [29]. Испытания проводятся на одном образце без ускоренных климатических испытаний и на образцах после проведенных ускоренных климатических испытаний по пп. 4.2–4.4 ГОСТ Р 53295-2009 [29].

В процессе проведения испытаний регистрируются следующие показатели:

- время достижения металлом опытного образца предельного состояния – температуры, равной 500 °С (среднее значение по показаниям трех термопар);
- изменение температуры в печи;
- поведение огнезащитного покрытия (вспучивание, обугливание, отслоение, выделение дыма, продуктов горения и т. д.);
- изменение температуры на необогреваемой поверхности опытного образца.

За положительный результат испытаний принимается время достижения предельного состояния металлом опытного образца после ускоренных климатических испытаний, отличающееся от результатов испытаний образца без ускоренных климатических испытаний менее чем на 20% в сторону уменьшения.

Оценка сохранности огнезащитных свойств средств огнезащиты методами термического анализа

Подготовку образцов и проведение испытаний выполняют согласно ГОСТ Р 53293-2009 [30]. Для оценки сохранности свойств огнезащитных покрытий после ускоренных испытаний по п. 4 ГОСТ Р 53293-2009 [30] или в процессе эксплуатации проводится анализ, при котором сравниваются результаты термического анализа (ТА), характеристики и графические зависимости для исходного огнезащитного покрытия (эталоны, идентификатора) и исследуемого образца после ускоренных испытаний. Подлежат сравнению характеристики и параметры, полученные только при полностью одинаковых условиях эксперимента (отклонение должно быть не более 3%) на приборах одного класса.

При анализе устанавливают следующие данные:

- наличие или отсутствие подобия сравниваемых ТА кривых во всем температурном диапазоне сравнения;
- наличие или отсутствие совпадения количества значимых максимумов термогравиметрической по производной (ДТГ) кривой в диапазоне 120–550 °С;
- величины отклонений при сравнении значимых идентификационных характеристик (параметров) образцов исследуемого материала и эталона при использовании экспериментально полученных среднеарифметических величин;
- значения потери массы при фиксированных температурах (в интервале 300–550 °С) для огнезащитных покрытий на неорганической основе;
- значения температур фиксированных потерь массы для огнезащитных покрытий на органической основе (в интервале 150–400 °С) и для огнезащитного покрытия на неорганической основе (в интервале 150–300 °С);
- температуры максимумов ДТГ кривой;
- зольный или коксовый остаток, %, при температуре окончания процесса деструкции;

- величины амплитуды максимумов ДТГ кривой;
- температуры максимумов пиков дифференциально-термического анализа (ДТА).

По результатам термического анализа проводится оценка сохранности огнезащитных свойств по ряду критериев.

По характеристикам ТА кривых и расчетным данным материалы сохраняют свои огнезащитные свойства при соблюдении следующих условий: зависимости термогравиметрические (ТГ), термогравиметрические по производной (ДТГ), а в оговоренных случаях дифференциально-термического анализа (ДТА) или дифференциально-сканирующей калориметрии (ДСК) имеют подобный вид: соответственно совпадает количество интервалов деструкции и совпадает количество пиков ДТГ, ДТА или ДСК.

Для тонкослойных вспучивающихся огнезащитных покрытий сохранение огнезащитных свойств дополнительно оценивается по коэффициенту вспучивания. Образец покрытия помещают в термошкаф при температуре 600 °С и выдерживают в течение 5 мин для получения вспученного слоя. Коэффициент вспучивания определяется как отношение толщины вспученного слоя к исходной толщине покрытия. Измерение толщин проводится в сечениях пяти образцов. Коэффициент вспучивания определяется как среднее арифметическое пяти измерений. Внешний вид образцов до и после испытания фиксируется на фотографиях.

Потеря огнезащитных свойств определяется при сравнительной оценке коэффициента вспучивания эталонного и исследуемого (после ускоренных испытаний) образцов. Допускается уменьшение среднеарифметического значения коэффициента вспучивания не более чем на 30% от исходного. При этом покрытие считается полностью утратившим огнезащитные свойства, если среднеарифметическое значение коэффициента вспучивания составляет менее 10.

В результате проведенного исследования разработаны методы ускоренных климатических испытаний тонкослойных вспучивающихся и конструктивных огнезащитных покрытий, оценки огнезащитных свойств и их сохранности методами термического анализа.

Заключение

Разработанные методы использованы при подготовке проекта национального стандарта «Конструкции стальные строительные с огнезащитными покрытиями. Методы испытаний антикоррозионных свойств и стойкости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации» для обеспечения нормативных требований пожарной безопасности для данных конструкций. Стандарт может быть использован при определении гарантийного срока эксплуатации огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций, при этом он не распространяется на определение их пределов огнестойкости.

Список литературы

1. Кривцов Ю.В., Ведяков И.И., Ладыгина И.Р., Носов Е.Н. Тонкослойные покрытия для огнезащиты стальных строительных конструкций. Промышленное и гражданское строительство. 2018;(10):50–53.
2. Кривцов Ю.В., Ладыгина И.Р. Материалы для конструктивной огнезащиты стальных строительных конструкций. Вестник НИЦ Строительство. 2019;(2):74–79.
3. Кривцов Ю.В., Ладыгина И.Р., Колесников П.П. Современные методы обеспечения огнестойкости стальных и железобетонных конструкций. Вестник НИЦ Строительство. 2017;(3):134–143.

4. *Кривцов Ю.В.* Современные средства противопожарной защиты. Промышленное и гражданское строительство. 2014;(9):5–7.
5. *Рязанова Г.Н., Горелов С.А.* Анализ перспективных огнезащитных покрытий металлических конструкций. В: Традиции и инновации в строительстве и архитектуре. Строительство. Самара: Самарский государственный архитектурно-строительный университет; 2016, с. 284–286.
6. *Барышников А.А., Горелов С.А., Мустафин Н.Ш.* Анализ перспективных огнезащитных покрытий металлических конструкций. Региональное развитие. 2016;(2):6.
7. *Bronzova M.K., Garifullin M.R.* Fire resistance of thin-walled cold-formed steel structures. Строительство уникальных зданий и сооружений. 2016;(3):61–78.
8. *Бод К., Сэше М., Фонтэно С., Фрим А., Жуков Р.* Огнезащитные покрытия: последние разработки в функциональных покрытиях, которые спасают жизнь. Лакокрасочные материалы и их применение. 2017;(6):20–27.
9. *Кривцов Ю.В., Ладыгина И.Р., Мельников Н.О.* Научно-практические аспекты выявления дефектов огнезащитных покрытий строительных конструкций. Вестник НИЦ Строительство. 2018;(3):91–101.
10. *Кривцов Ю.В., Ладыгина И.Р., Грошев Ю.М., Комарова М.А., Еремина Г.П.* Оценка технического состояния, остаточного ресурса и продления срока службы огнезащитных покрытий металлоконструкций машинных залов АЭС. Вестник НИЦ «Строительство». 2023;36(1):41–50. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-41-50](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-41-50)
11. *Докучаева Л.В., Старостенков А.С., Мельников Н.О.* Исследование процессов ускоренного старения огнезащитных покрытий. Успехи в химии и химической технологии. 2012;26(2):99–104.
12. *Гравит М.В.* Исследование влияния различных факторов на коэффициент вспучивания органорастворимых огнезащитных покрытий. Лакокрасочные материалы и их применение. 2013;(6):12–17.
13. *Калмагамбетова А.Ш., Аяпбергенова Б.Е., Дивак Л.А., Бакирова Д.Г.* Исследование атмосферостойких огнезащитных вспучивающихся покрытий. Фундаментальные исследования. 2013;(4-3):571–574.
14. *Мельников Н.О., Старостенков А.С., Яковенко Т.В., Акинин Н.И.* Исследование сохранения эффективности огнезащитных покрытий после ускоренного старения. В: Успехи в специальной химии и химической технологии. Труды Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 80-летию основания Инженерного химико-технологического факультета РХТУ им. Д.И. Менделеева. Москва: Российский химико-технологический университет им. Д.И. Менделеева; 2015, с. 388–392.
15. *Умрихина М.Ю., Шорохова Т.О., Пьянкова Л.А., Кудрявцев А.А., Уткин С.В.* Исследование старения огнезащитных вспучивающихся покрытий методами СЭМ, XRD и ИК-спектроскопии. Пожаровзрывобезопасность. 2020;29(5):60–70. <https://doi.org/10.22227/PV.2020.29.05.60-70>.
16. *Яковлев А.Д.* Химия и технология лакокрасочных покрытий. Ленинград: Химия; 1989.
17. *Карякина М.И.* Физико-химические основы процессов формирования и старения покрытий. Москва: Химия; 1980.
18. ГОСТ 9.401-2018. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Общие требования и методы ускоренных испытаний на стойкость к воздействию климатических факторов. Москва: Стандартинформ; 2018.
19. *Смирнов Н.В., Дудеров Н.Г., Булага С.Н., Булгаков В.В., Михайлова Е.Д., Толпекина Н.А., Лезова М.В.* Оценка огнезащитных свойств покрытий в зависимости от сроков их эксплуатации: методика. Москва: ВНИИПО; 2016.
20. EAD 350402-00-1106. Fire protective products. Reactive coatings for fire protection of steel elements [internet]. EOTA; 2017. Available at: https://www.eota.eu/download?file=/2015/15-35-0402/ead%20for%20jeu/ead%20350402-00-1106_jeu2017.pdf
21. ГОСТ 16523-97. Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия. Минск: Издательство стандартов; 1999.
22. ГОСТ 9045-93. Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки. Технические условия. Минск: Издательство стандартов; 1996.
23. ГОСТ 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ). Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Группы условий эксплуатации. Москва: Стандартинформ; 2019.
24. ГОСТ 15150-69. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. Москва: Стандартинформ; 2010.
25. ГОСТ 9.407-2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. Москва: Стандартинформ; 2015.

26. ГОСТ Р 51372-99. Методы ускоренных испытаний на долговечность и сохраняемость при воздействии агрессивных и других специальных сред для технических изделий, материалов и систем материалов. Общие положения. Москва: Госстандарт России; 2000.
27. ГОСТ Р 51369-99. Методы испытаний на стойкость к климатическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на воздействие влажности. Москва: Госстандарт России; 2000.
28. ГОСТ 7076-99. Материалы и изделия строительные. Метод определения теплопроводности и термического сопротивления при стационарном тепловом режиме. Москва: Госстрой России; 2000.
29. ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. Москва: Стандартинформ; 2009.
30. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. Москва: Стандартинформ; 2011.

References

1. *Krivtsov Yu.V., Vedyakov I.I., Ladygina I.R., Nosov E.N.* Thin-layer coatings for fire protection of steel building structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*. 2018;(10):50–53. (In Russian).
2. *Krivtsov Yu.V., Ladygina I.R.* Materials for constructional fire protection of structural steel members. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2019;21(2):74–79. (In Russian).
3. *Krivtsov Yu.V., Ladygina I.R., Kolesnikov P.P.* Modern methods of ensuring fire resistance of steel and reinforced concrete structures. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2017;(3):134–143. (In Russian).
4. *Krivtsov Yu.V.* Modern means of fire protection. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitelstvo = Industrial and Civil Engineering*. 2014;(9):5–7. (In Russian).
5. *Ryazanova G.N., Gorelov S.A.* Analysis of perspective fireproof coatings for metal structures. In: *Traditions and Innovations in Construction and Architecture*. Construction. Samara: Samara State University of Architecture and Civil Engineering; 2016, p. 284–286. (In Russian).
6. *Baryshnikov A.A., Gorelov S.A., Mustafin N.Sh.* Analysis of perspective fireproof coatings of steel structures. *Regional'noe razvitie*. 2016;(2):6. (In Russian).
7. *Bronzova M.K., Garifullin M.R.* Fire resistance of thin-walled cold-formed steel structures. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2016;(3):61–78.
8. *Baud K., Sesche M., Fonteno S., Frim A., Zhukov R.* Fireproof coatings: recent developments in functional coatings that save lives. *Lakokrasochnie materialy i ikh primeneniye = Russian Coatings Journal*. 2017;(6):20–27. (In Russian).
9. *Krivtsov Yu.V., Ladygina I.R., Melnikov N.O.* Scientific and practical aspects of defects detection of fireproof coatings of building structures. *Vestnik NIC Stroitel'`stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2018;(3):91–101. (In Russian).
10. *Krivtsov Yu.V., Ladygina I.R., Groshev Yu.M., Komarova M.A., Eremina G.P.* Estimation of technical condition, residual resource and service life extension of fireproof coatings of steel structures of the NPP machine halls. *Vestnik NIC Stroitel'`stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;36(1):41–50. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1\(36\)-41-50](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-1(36)-41-50)
11. *Dokuchaeva L.V., Starostenkov A.S., Melnikov N.O.* Investigation of the accelerated aging processes of fireproof coatings. *Uspekhi v khimii i khimicheskoy tekhnologii*. 2012;26(2):99–104. (In Russian).
12. *Gravit M.V.* Investigation of the influence of various factors on the swelling coefficient of organosoluble fireproof coatings. *Lakokrasochnie materialy i ikh primeneniye = Russian Coatings Journal*. 2013;(6):12–17. (In Russian).
13. *Kalmagambetova A.Sh., Ayapbergenova B.E., Divak L.A., Bakirova D.G.* Research of weather-resistant fireproof coatings. *Fundamental Research*. 2013;(4-3):571–574. (In Russian).
14. *Melnikov N.O., Starostenkov A.S., Yakovenko T.V., Akinin N.I.* Research of the fireproof coatings efficiency preservation after the accelerated aging. In: *Successes in special chemistry and chemical technology*. Proceedings of the All-Russian scientific and technical conference dedicated to the 80th anniversary of the

founding of the Engineering Chemical Technology Faculty of D.I. Mendeleev Russian Chemical University. Moscow: Mendeleev Russian University of Chemical Technology; 2015, pp. 388–392. (In Russian).

15. *Umrikhina M.Yu., Shorokhova T.O., Pyankova L.A., Kudryavtsev A.A., Utkin S.V.* Using scanning electron microscopy, x-ray diffraction and IR spectroscopy to study the ageing of intumescent fire-proof coatings. *Pozharovzryvobezopasnost = Fire and Explosion Safety.* 2020;29(5):60–70. (In Russian). <https://doi.org/10.22227/pvb.2020.29.05.60-70>

16. *Yakovlev A.D.* Chemistry and technology of paint and varnish coatings. Leningrad: Khimiya Publ.; 1989. (In Russian).

17. *Karyakina M.I.* Physico-chemical bases of processes of formation and aging of coatings. Moscow: Khimiya Publ.; 1980. (In Russian).

18. State Standard 9.401-2018. Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. General requirements and methods of accelerated tests on resistance to the influence of climatic factors. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).

19. *Smirnov N.V., Duderov N.G., Bulaga S.N., Bulgakov V.V., Mikhailova E.D., Tolpekina N.A., Lezova M.V.* Evaluation of fireproof properties of coatings depending on their service life: methodology. Moscow: VNIIPPO; 2016. (In Russian).

20. EAD 350402-00-1106. Fire protective products. Reactive coatings for fire protection of steel elements [internet]. EOTA; 2017. Available at: https://www.eota.eu/download?file=/2015/15-35-0402/ead%20for%20ojeu/ead%20350402-00-1106_ojeu2017.pdf

21. State Standard 16523-97. Rolled sheets from quality and ordinary carbon steel for general purposes. Specifications. Minsk: Publishing house of standards; 1999. (In Russian).

22. State Standard 9045-93. Cold-rolled thin sheets of low-carbon steel for cold stamping. Specifications. Minsk: Publishing house of standards; 1996. (In Russian).

23. State Standard 9.104-2018 (ISO 12944-2:2017, NEQ). Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. Groups of operation conditions. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).

24. State Standard 15150-69. Machines, instruments and other industrial products. Modifications for different climatic regions. Categories, operating, storage and transportation conditions as to environment climatic aspects influence. Moscow: Standartinform Publ.; 2010. (In Russian).

25. State Standard 9.407-2015. Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. Method of appearance rating. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).

26. State Standard R 51372-99. Accelerated life and storable life test methods in special aggressive and other special media for technical products, materials and systems of materials. General. Moscow: Gosstandart of Russia; 2000. (In Russian).

27. State Standard R 51369-99. Climatic environment stability test methods for machines, instruments and other industrial products. Test for influence of humidity. Moscow: Gosstandart of Russia; 2000. (In Russian).

28. State Standard 7076-99. Building materials and products. Method of determination of steady-state thermal conductivity and thermal resistance. Moscow: Gosstroy of Russia; 2000. (In Russian).

29. State Standard R 53295-2009. Fire retardant compositions for steel constructions. General requirement. Method for determining fire retardant efficiency. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (In Russian).

30. State Standard R 53293-2009. Fire hazard of substances and materials. Materials, substance and fire protective means. Identification by thermal analysis methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2011. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

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

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

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

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

Nikita O. Melnikov[✉], Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Senior Researcher, Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Russian Chemical-Technological University named after D.I. Mendeleev, Moscow
e-mail: no.melnikov@yandex.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.04

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-35-48](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-35-48)

EDN: CYHKDR

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ ЗАДАЧИ ОБОБЩЕННОЙ СИСТЕМЫ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ

Д.Н. НИЗОМОВ¹, д-р техн. наук
А.М. САНГИНОВ^{1,✉}, канд. техн. наук
М.М. САЛОМЗОДА²

¹ Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, ул. Айни, д. 267, г. Душанбе, 734063, Республика Таджикистан

² ГУП «Научно-исследовательский институт «Строительство и архитектура» Комитета по архитектуре и строительства при Правительстве РТ, ул. Хусейнзаде, д. 36а, г. Душанбе, 734025, Республика Таджикистан

Аннотация

Введение. В статье излагаются вопросы математического моделирования динамической задачи в виде обобщенной системы с одной степенью свободы. К таким системам относятся высотные сооружения башенного типа. Обеспечение сейсмостойкости уникальных объектов башенного типа является актуальной проблемой.

Целью работы является определения напряженно-деформированного состояния исследуемого объекта от внешнего воздействия в виде заданной акселерограммы землетрясения.

Материалы и методы. Используются методы строительной механики, динамики сооружений, а также методы численного моделирования. На основе уравнения Лагранжа получено уравнение движения обобщенной системы с распределенными параметрами. Методика исследований включала построение математических моделей рассматриваемых систем, их численный анализ, сопоставление полученных результатов с имеющимися данными.

Результаты. Разработана математическая модель, позволяющая проводить исследования напряженно-деформированного состояния сооружения при различных внешних воздействиях, в том числе сейсмических. Дифференциальное уравнение обобщенной системы решается непосредственно с использованием метода последовательных аппроксимаций и с использованием интеграла Дюамеля на каждом шаге по времени. На основе разработанного алгоритма составлена компьютерная программа на языке FORTRAN и получены кинематические и статические данные исследуемого объекта. На примере сооружения башенного типа исследованы свободные колебания от действия мгновенного импульса и получены результаты от заданной акселерограммы землетрясения.

Выводы. Из полученных результатов следует, что период свободных колебаний объекта совпадает с результатами численного моделирования. Результаты, полученные численным дифференцированием, практически совпадают с результатами численного интегрирования при различных воздействиях. Достоверность результатов подтверждается сравнением результатов, полученных двумя методами. Разработанные компьютерные программы могут быть использованы для проведения мониторинга уникальных объектов башенного типа.

Ключевые слова: математическая модель, обобщенная система, сейсмическое воздействие, потенциальная энергия, уравнение Лагранжа, кинетическая энергия

Для цитирования: Низомов Д.Н., Сангинов А.М., Саломзода М.М. Численное моделирование динамической задачи обобщенной системы с распределенными параметрами. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):35–48. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-35-48](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-35-48)

Вклад авторов

Низомов Д.Н. – постановка задачи исследования, разработка математической модели, разработка компьютерной программы, проведение численных экспериментов и подтверждение достоверности результатов, написание текста статьи.

Сангинов А.М. – анализ результатов исследований в области зданий и сооружений башенного типа переменного сечения по высоте и подготовка данных, работа над систематизацией материала, написание текста статьи.

Саломзода М.М. – анализ результатов исследований в области зданий и сооружений башенного типа переменного сечения по высоте и подготовка данных, работа над систематизацией материала.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Поступила в редакцию 30.10.2023

Поступила после рецензирования 04.12.2023

Принята к публикации 07.12.2023

NUMERICAL SIMULATION OF THE DYNAMIC PROBLEM OF A GENERALIZED SYSTEM WITH DISTRIBUTED PARAMETERS

D.N. NIZOMOV¹, Dr. Sci. (Engineering)

A.M. SANGINOV^{1,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

M.M. SALOMZODA²

¹ *Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology of the National Academy of Sciences of Tajikistan (NAST), Aini str., 267, Dushanbe, 734063, the Republic of Tajikistan*

² *State Unitary Enterprise “Research Institute “Construction and Architecture” of the Committee on Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan, st. Huseynzade, 36a, Dushanbe, 734025, Republic of Tajikistan*

Abstract

Introduction. Questions of mathematical modeling of the dynamic problem in the form of a generalized system with one degree of freedom are discussed. Such systems include high-rise tower-type structures. Seismic stability of unique tower-type objects represents a relevant research problem.

Aim. To determine the stress-strain state of a studied object under the action of external factors in the form of an earthquake accelerogram.

Materials and methods. The methods of structural mechanics, dynamics of structures, and numerical simulation were used. The Lagrange equation was used as a basis for obtaining the motion equation of a generalized system with distributed parameters. The research methodology also included mathematical modeling of the considered systems, their numerical analysis, comparison of the obtained results with literature data.

Results. A mathematical model was developed to investigate the stress-strain state of engineering structures under various external, including seismic, effects. The differential equation of the generalized system is solved directly using the method of successive approximations and the Duhamel integral at each time step.

The developed algorithm was used to compile a software application in the FORTRAN language followed by obtaining the kinematic and static data of the investigated object. Using the example of a tower-type structure, free vibrations from the action of an instantaneous impulse were investigated. The results from a given earthquake accelerogram are presented.

Conclusions. The results obtained on the free vibrations of the object under study agree well with those obtained by numerical simulation. The results obtained by numerical differentiation are effectively identical with those obtained by numerical integration, under the action of various effects. The validity of the results is confirmed by comparing the results obtained by the two methods. The developed software applications can be used for monitoring the state of unique tower-type objects.

Keywords: mathematical simulation, generalized system, seismic impact, potential energy, Lagrange equation, kinetic energy

For citation: Nizomov D.N., Sanginov A.M., Salomzoda M.M. Numerical simulation of the dynamic problem of a generalized system with distributed parameters. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):35–48. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-35-48](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-35-48)

Author contribution statements

Nizomov D.N. – formulation of a research problem, development of a mathematical model, development of a software application, conducting numerical experiments and their validation, article writing.

Sanginov A.M. – analysis of the research data on the tower-type engineering structures of variable cross-section in height, data interpretation and generalization, article writing.

Salomzoda M.M. – analysis of the research data on the tower-type engineering structures of variable cross-section in height, data interpretation and generalization.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 30.10.2023

Revised 04.12.2023

Accepted 07.12.2023

Рассмотрим динамическую модель сооружения, которая представляет собой систему с распределенной массой $m(x)$ и сосредоточенными массами m_j , установленными в некоторых точках (рис. 1). Данное сооружение башенного типа, в котором основными характеристиками являются изгибная жесткость $EI(x)$ и погонная масса $m(x)$, представляет систему с бесконечным числом степеней свободы. Если предположить, что перемещения сооружения ограничены только одной формой колебаний, то такая модель с обобщенной координатой $w(t)$ может быть использована для расчета на сейсмические воздействия в виде заданной акселерограммы землетрясения. Таким образом, предполагается, что движение сооружения, как обобщенная система с одной степенью свободы, происходит только по одной форме в виде безразмерной функции $\varphi(x)$ с амплитудой колебаний $w(t)$. Следовательно, при такой форме движения перемещение и соответствующие производные по времени выражаются так:

$$\begin{aligned} W(x,t) &= w(t)\varphi(x), \\ \dot{W}(x,t) &= \dot{w}(t)\varphi(x), \\ \ddot{W}(x,t) &= \ddot{w}(t)\varphi(x). \end{aligned} \tag{1}$$

При заданном перемещении основания в виде функции $w_0(t)$, общие перемещение, скорость и квадрат скорости записываются таким образом:

$$\begin{aligned} W_1(x,t) &= W(x,t) + w_0(t) = w(t)\varphi(x) + w_0(t), \\ \dot{W}_1(x,t) &= \dot{w}(t)\varphi(x) + \dot{w}_0(t), \\ \dot{W}_1^2(x,t) &= \dot{w}^2(t)\varphi^2(x) + 2\dot{w}(t)\varphi(x)\dot{w}_0(t) + \dot{w}_0^2(t). \end{aligned} \tag{2}$$

Для определения потенциальной энергии исследуемого объекта, который испытывает изгиб и продольное сжатие, необходимо иметь вторую производную от функции $W(x,t)$ по x :

$$W''(x,t) = w(t) \times \varphi''(x),$$

а также вертикальную составляющую верхней точки сооружения (рис. 1):

$$\Delta = \int_0^l d\Delta.$$

С учетом малости перемещения $d\Delta$ [1] можно написать:

$$\begin{aligned} d\Delta &= dx(1 - \cos \alpha) = dx \times 2 \sin^2 \frac{\alpha}{2} \approx 2dx \frac{\alpha^2}{4} \approx dx \frac{tg^2 \alpha}{2} = dx \frac{1}{2} \left(\frac{dw}{dx} \right)^2, \\ \Delta &= \int_0^l d\Delta = \frac{1}{2} \int_0^l (W'')^2 dx = w^2(t) \frac{1}{2} \int_0^l [\varphi'(x)]^2 dx. \end{aligned} \tag{2a}$$

Уравнение движения. Для вывода уравнений движения обобщенной системы воспользуемся уравнением Лагранжа второго рода, соответствующего вариационному принципу Гамильтона [2–4]:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{w}} \right) - \frac{\partial T}{\partial w} + \frac{\partial U}{\partial w} = Q_p + Q_d, \tag{3}$$

где T – кинетическая энергия;

U – потенциальная энергия деформации изгиба;

Q_p – обобщенная сила (сила трения или внешняя возмущающая сила, зависящая от времени);

Q_d – обобщенная сила сопротивления.

Кинетическая и потенциальная энергии модели, представленной на рис. 1, с учетом (1), (2) и (2a) записываются в виде:

$$\begin{aligned} T &= \frac{1}{2} \int_0^l m(x) \dot{W}_1^2(x,t) dx + \frac{1}{2} \sum_j m_j \dot{W}_1^2(x,t) = \\ &= \frac{1}{2} \int_0^l m(x) \dot{w}^2(t) \varphi^2(x) dx + \int_0^l m(x) \dot{w}(t) \varphi(x) \dot{w}_0(t) dx + \frac{1}{2} \int_0^l m(x) [\dot{w}_0(t)]^2 dx + \\ &\quad + \frac{1}{2} \sum_j m_j \left[\dot{w}^2(t) \varphi_j^2 + 2\dot{w}(t) \varphi_j \dot{w}_0(t) + \dot{w}_0^2(t) \right], \end{aligned}$$

$$U_M = \frac{1}{2} \int_0^l M(x,t) W'' dx = \frac{1}{2} \int_0^l EI(x) (W'')^2 dx = \frac{w^2(t)}{2} \int_0^l EI(x) [\varphi''(x)]^2 dx,$$

$$U_N = -\frac{1}{2} \int_0^l N(x) d\Delta = -\frac{w^2(t)}{2} \int_0^l N(x) [\varphi'(x)]^2 dx,$$
(4)

где $N(x)$ – нормальная сила от собственного веса сооружения, которая может изменяться по линейному закону.

Суммарная потенциальная энергия от изгибающего момента и сжимающей силы будет равняться

$$U = U_M + U_N = w^2(t) \frac{1}{2} \int_0^l EI(x) [\varphi''(x)]^2 dx - w^2(t) \frac{1}{2} \int_0^l N(x) [\varphi'(x)]^2 dx.$$
(5)

Здесь предполагается, что опорная часть сооружения во время землетрясения приобретает только горизонтальное перемещение.

Производные от кинетической и потенциальной энергии с учетом (4) и (5) приобретают вид

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{w}} = \dot{w}(t) \int_0^l m(x) \varphi^2(x) dx + \dot{w}_0(t) \int_0^l m(x) \varphi(x) dx + \Sigma m_j [\dot{w}(t) \varphi_j^2 + \varphi_j \dot{w}_0(t)],$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{w}} \right) = \ddot{w}(t) \int_0^l m(x) \varphi^2(x) dx + \ddot{w}_0(t) \int_0^l m(x) \varphi(x) dx + \ddot{w}(t) \Sigma m_j \varphi_j^2 + \ddot{w}_0(t) \Sigma m_j \varphi_j,$$
(6)

$$\frac{\partial T}{\partial w} = 0,$$
(7)

$$\frac{\partial U}{\partial w} = w(t) \int_0^l EI(x) [\varphi''(x)]^2 dx - w(t) \int_0^l N(x) [\varphi'(x)]^2 dx.$$
(8)

Обобщенная сила сопротивления определяется по формуле

$$Q_d = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{w}},$$

где Φ – диссипативная функция Рэлея [5, 6], которая для системы с распределенными параметрами затухания представляется в виде

$$\Phi = \frac{1}{2} \int_0^l c(x) [\dot{W}(x,t)]^2 dx = \frac{1}{2} \int_0^l c(x) [\dot{w}(t)]^2 [\varphi(x)]^2 dx,$$

$$Q_d = -\frac{\partial \Phi}{\partial \dot{w}} = -\dot{w}(t) \int_0^l c(x) [\varphi(x)]^2 dx,$$
(9)

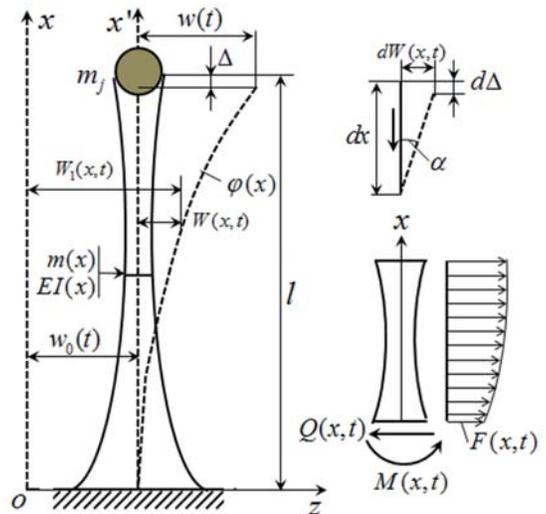


Рис. 1. Обобщенная система с распределенной массой
 Fig. 1. Generalized system with distributed mass

Внося (6)–(9) в (3), получаем уравнение

$$\ddot{w}(t) \left[\int_0^l m(x) \varphi^2(x) dx + \sum m_j \varphi_j^2 \right] + w(t) \int_0^l EI(x) [\varphi''(x)]^2 dx - w(t) \int_0^l N(x) [\varphi'(x)]^2 dx = -\dot{w}(t) \int_0^l c(x) [\varphi(x)]^2 dx - \ddot{w}_0(t) \left[\int_0^l m(x) \varphi(x) dx + \sum m_j \varphi_j \right],$$

которое представляется в виде

$$m^* \ddot{w}(t) + c^* \dot{w}(t) + k^* w(t) = -\bar{m} \ddot{w}_0(t), \tag{10}$$

$$m^* = \int_0^l m(x) \varphi^2(x) dx + \sum m_j \varphi_j^2, \tag{10а}$$

$$k^* = \int_0^l EI(x) [\varphi''(x)]^2 dx - \int_0^l N(x) [\varphi'(x)]^2 dx, \tag{10б}$$

$$c^* = \int_0^l c(x) [\varphi(x)]^2 dx, \quad \bar{m} = \int_0^l m(x) \varphi(x) dx + \sum m_j \varphi_j, \tag{10в}$$

где m^* , k^* , c^* – обобщенные масса, жесткость и затухания;

\bar{m} – коэффициент сейсмического возмущения, который характеризует уровень возможных колебаний сооружения по форме $\varphi(x)$ [7].

Поделив обе части (10) на обобщенную массу m^* , получим

$$\ddot{w}(t) + 2\xi\omega\dot{w}(t) + \omega^2 w(t) = -\mu \ddot{w}_0(t),$$

$$\mu = \bar{m}/m^*, \quad 2\xi\omega = c^*/m^*, \quad \omega = k^*/m^*. \tag{11}$$

Дифференциальное уравнение (11) описывает динамическое состояние обобщенной системы с одной степенью свободы от сейсмического воздействия в виде заданной акселерограммы. Здесь предполагается, что функции $\varphi(x)$, $c(x)$, $m(x)$, $EI(x)$, $N(x)$ будут заданы в зависимости от геометрических и физико-механических свойств исследуемого объекта. Коэффициент μ в (10) характеризует различие между одномассовыми системами с сосредоточенной и обобщенной массами.

Обобщенные характеристики. Рассмотрим сооружение башенного типа переменного сечения по высоте. Предполагается, что сооружение круглого сечения в плане состоит из двух центральных колец постоянного сечения, идущих от основания до верхней части объекта и наружных колец, число которых в зависимости от высоты уменьшается. При этом безразмерная функция формы $\varphi(x)$, распределенная масса $m(x)$, момент инерции $I(x)$ и нормальная сила $N(x)$ в исследуемом объекте изменяются по следующим законам:

$$\varphi(x) = 1 - \cos(\pi x / 2l), \quad 0 \leq x \leq l, \tag{12}$$

$$m(x) = m_1 \cos \frac{\pi x}{2a} + m_0, \quad 0 \leq x \leq a, \quad m(x) = m_0, \quad a < x \leq l, \tag{13}$$

$$I(x) = I_1 \cos \frac{\pi x}{2a} + I_0, \quad 0 \leq x \leq a, \quad I(x) = I_0, \quad a < x \leq l, \quad (14)$$

где m_1, I_1 – масса и момент инерции опорной части без учета центральной части;

m_0, I_0 – масса и момент инерции центральной части сооружения;

a – длина нижней части сооружения с переменным сечением.

Тогда из (10а) с учетом (12), (13) получим интегральное выражение обобщенной массы:

$$\begin{aligned} m^* &= \int_0^l m(x) \varphi^2(x) dx = \int_0^l \left(m_1 \cos \frac{\pi x}{2a} + m_0 \right) \left[1 - \cos \left(\frac{\pi x}{2l} \right) \right]^2 dx = \\ &= m_1 \int_0^a \left(\cos \frac{\pi x}{2a} - \cos \frac{\pi x}{2a} 2 \cos \frac{\pi x}{2l} + \cos \frac{\pi x}{2a} \cos^2 \frac{\pi x}{2l} \right) dx + \\ &+ m_0 \int_0^a \left(1 - 2 \cos \frac{\pi x}{2l} + \cos^2 \frac{\pi x}{2l} \right) dx + m_0 \int_a^l \left(1 - 2 \cos \frac{\pi x}{2l} + \cos^2 \frac{\pi x}{2l} \right) dx. \end{aligned} \quad (15)$$

Из (10б) с учетом (14) и производных от функции формы

$$\varphi'(x) = \left(\frac{\pi}{2l} \right) \sin \frac{\pi x}{2l}, \quad \varphi''(x) = \left(\frac{\pi^2}{4l^2} \right) \cos \frac{\pi x}{2l}$$

получим интегральное выражение обобщенной жесткости изгибающего момента

$$\begin{aligned} k_M^* &= \int_0^l EI(x) (\varphi''(x))^2 dx = \\ &= E \int_0^a \left(I_1 \cos \frac{\pi x}{2a} + I_0 \right) \left(\frac{\pi^2}{4l^2} \cos \frac{\pi x}{2l} \right)^2 dx + EI_0 \int_a^l \left(\frac{\pi^2}{4l^2} \cos \frac{\pi x}{2l} \right)^2 dx = \\ &= \left(\frac{\pi^2}{4l^2} \right)^2 \left[EI_1 \int_0^a \cos \frac{\pi x}{2a} \left(\cos \frac{\pi x}{2l} \right)^2 dx + EI_0 \int_0^a \left(\cos \frac{\pi x}{2l} \right)^2 dx + EI_0 \int_a^l \left(\cos \frac{\pi x}{2l} \right)^2 dx \right]. \end{aligned} \quad (16)$$

Если предположить, что нормальная сжимающая сила

$$N(x) = N = \gamma A_{\text{cp}} l, \quad A_{\text{cp}} = (A_1 + A_0)/2,$$

где γ, A_1, A_0 – объемный вес, площади сечений элементов на внешних кольцах и в центральной части объекта, получаем

$$k_N^* = \int_0^l N(x) (\varphi'(x))^2 dx = \gamma A_{\text{cp}} l \frac{\pi^2}{4l^2} \int_0^l \sin^2 \frac{\pi x}{2l} dx. \quad (17)$$

Обобщенная масса в правой части (10) выражается следующим образом

$$\begin{aligned} \bar{m} &= \int_0^l m(x) \varphi(x) dx = \int_0^a \left(m_1 \cos \frac{\pi x}{2a} + m_0 \right) \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right) dx + \int_a^l m_0 \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right) dx = \\ &= \int_0^a m_1 \left(\cos \frac{\pi x}{2a} - \cos \frac{\pi x}{2a} \cos \frac{\pi x}{2l} \right) dx + m_0 \int_0^a \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right) dx + m_0 \int_a^l \left(1 - \cos \frac{\pi x}{2l} \right) dx. \end{aligned} \quad (18)$$

Если принять, что $a = l/3$, то непосредственным интегрированием [8] из (15)–(18) получим

$$\begin{aligned}
 m^* &= 0,06406 \times m_1 l + 0,2268 \times m_0 l, \\
 k_M^* &= \pi^3(0,4167EI_1 + 0,7854EI_0)/8l^3, \\
 \bar{m} &= 0,005475m_1 l + 0,3634m_0 l, \\
 k_N^* &= 0,6168 (A_1 + A_0)\gamma, \\
 2\xi\omega &= c^*/m^*, \quad \xi = c^*/m^*2\omega = 0,05
 \end{aligned}
 \tag{19}$$

Полученные обобщенные параметры системы (19), при заданных значениях $m_0, m_1, I_0, I_1, A_0, A_1$, позволяют перейти к решению дифференциального уравнения (11). Из решения уравнения (11) определяется $w(t)$, а затем с использованием (1) вычисляются перемещения, скорость и ускорения в произвольных точках по оси x , соответствующие моменту времени t . Далее вычисляются внутренние усилия в сечениях исследуемого объекта.

При заданной правой части (11) в виде реальной или синтезированной акселерограммы решение осуществляется либо интегралом Дюамеля с последующим численным интегрированием, либо непосредственным численным дифференцированием. Ниже рассматривается реализация обоих методов на примере системы с распределенными параметрами.

Численное дифференцирование. С целью численного решения дифференциального уравнения (11) применим метод последовательных аппроксимаций [9, 10], где скорость и ускорения, соответствующие моменту времени t_n , представляются в виде

$$\dot{w}_n = \frac{\beta_1}{\tau} (w_n - w_{n-1}) - \beta_2 \dot{w}_{n-1} - \tau\beta_3 \ddot{w}_{n-1},
 \tag{20}$$

$$\ddot{w}_n = \frac{\alpha_1}{\tau^2} (w_n - w_{n-1}) - \frac{\alpha_2}{\tau} \dot{w}_{n-1} - \alpha_3 \ddot{w}_{n-1},
 \tag{21}$$

где α_i, β_i – числовые коэффициенты [11];

$\tau = t_n - t_{n-1}$ – шаг по времени.

Записав уравнение (11) в момент времени t_n и внося (20) и (21) в (11), после некоторых преобразований получим рекуррентную формулу для определения w_n

$$\begin{aligned}
 w_n &= (bw_{n-1} + c\dot{w}_{n-1} + d\ddot{w}_{n-1} - \mu\ddot{w}_{0,n})/a, \\
 &(n = 1, 2, \dots, N), \\
 \alpha &= \frac{\alpha_1}{\tau^2} + 2\xi\omega \frac{\beta_1}{\tau} + \omega^2, \\
 b &= \frac{\alpha_1}{\tau^2} + 2\xi\omega \frac{\beta_1}{\tau}, \quad c = \frac{\alpha_2}{\tau} + 2\xi\omega\beta_2, \quad d = \alpha_3 + \tau\beta_3 2\xi\omega, \\
 \alpha_1 &= \alpha_2 = 4, \quad \alpha_3 = 1, \quad \beta_1 = 2, \quad \beta_2 = 1, \quad \beta_3 = 0.
 \end{aligned}
 \tag{22}$$

Затем с использованием (1) определяются перемещения, скорость и ускорения в произвольной точке координатной оси x , по длине сооружения, соответствующие моменту времени t_n дискретной оси t

$$\begin{aligned} W_n(x) &= w_n \varphi(x), \\ \dot{W}_n(x) &= \dot{w}_n \varphi(x), \\ \ddot{W}_n(x) &= \ddot{w}_n \varphi(x). \end{aligned} \quad (23)$$

Затем вычисляются значения сил инерции и сил упругости:

$$f_{in}(x) = m(x) \ddot{W}_{1,n}(x) = m(x) \times (\ddot{w}_n \varphi(x) + \ddot{w}_{0,n}) = m(x) \ddot{w}_n \varphi(x) + m(x) \ddot{w}_{0,n}, \quad (24)$$

$$f_{s,n}(x) = \omega^2 m(x) W(x, t) = \omega^2 m(x) w_n \times \varphi(x). \quad (25)$$

Поперечная сила и изгибающий момент в точке, расположенной на высоте h от основания сооружения, выражаются следующим образом:

$$Q(t) = \int_h^l f_s(x, t) dx = \omega^2 w_n \int_h^l m(x) \varphi(x) dx, \quad (26)$$

$$M(t) = \int_h^l f_s(x, t) x dx = \omega^2 w_n \int_h^l x m(x) \varphi(x) dx. \quad (27)$$

Если функции $m(x)$ и $\varphi(x)$ заданы, то интегралы (26) и (27) вычисляются непосредственным интегрированием.

Численное моделирование с применением интеграла Дюамеля. Решение уравнения (11) можно также представить интегралом Дюамеля [7]:

$$w(t) = -\lambda \int_0^t \ddot{w}_0(\tau) \exp[-\xi \omega(t - \tau)] \sin \omega(t - \tau) d\tau, \quad \lambda = \bar{m}/m^* \omega. \quad (28)$$

Этот интеграл с учетом

$$\sin \omega(t - \tau) \sin \omega t \cos \omega t - \cos \omega t \sin \omega t$$

представляется в виде

$$w(t) = -\lambda [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t], \quad (29)$$

$$a(\omega) = \int_0^t \ddot{w}_0(\tau) \exp[-\xi \omega(t - \tau)] \cos \omega \tau d\tau,$$

$$b(\omega) = \int_0^t \ddot{w}_0(\tau) \exp[-\xi \omega(t - \tau)] \sin \omega \tau d\tau.$$

Интегралы $a(\omega)$ и $b(\omega)$ в (28) вычисляются методом Симпсона [12]. При этом шаг интегрирования выбирается в зависимости от шага оцифровки заданной акселерограммы $\ddot{w}_0(t)$. Затем вычисляются перемещения, скорость и ускорения в произвольной точке сооружения:

$$\begin{aligned}
 W(x,t) &= w(t) \times \varphi(x) = -\lambda [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \varphi(x), \\
 \dot{W}(x,t) &= \dot{w}(t) \times \varphi(x) = -\lambda \omega [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] \varphi(x) - \\
 &\quad - \xi \omega \lambda [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \varphi(x), \\
 \ddot{W}(x,t) &= \ddot{w}(t) \times \varphi(x) = \lambda (1 + 2\xi^2) \omega^2 [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t] \varphi(x) + \\
 &\quad + 2\xi \omega^2 \lambda [a(\omega) \cos \omega t + b(\omega) \sin \omega t] \varphi(x).
 \end{aligned}
 \tag{30}$$

Далее определяются распределенная сила упругости, сдвигающая сила и изгибающий момент в основании сооружения:

$$\begin{aligned}
 f_s(x,t) &= \omega^2 m(x) W(x,t) = \omega^2 m(x) w(t) \times \varphi(x) = \\
 &= -m(x) \varphi(x) \omega \frac{\bar{m}}{m^*} [a(\omega) \sin \omega t - b(\omega) \cos \omega t], \\
 Q_0(t) &= \int_0^l f_s(x,t) dx, \quad M_0(t) = \int_0^l f_s(x,t) x dx.
 \end{aligned}$$

На основе изложенных выше алгоритмов численного моделирования были разработаны компьютерные программы и получены результаты от заданного воздействия в виде акселерограммы землетрясения.

Пример. В качестве примера рассматривается сооружение башенного типа (рис. 2), которое состоит из ряда колонн, расположенных во внешних кольцах, а также из двух центральных колец сплошного сечения, соединенных между собой диафрагмами жесткости (рис. 2б). При этом количество внешних колец постепенно уменьшается и на высоте $x \geq h_1$ остаются только центральные кольца.

Суммарные площади сечений, распределенные массы и моменты инерции несущих элементов центральных (A_0, m_0, I_0) и пяти внешних колец (A_1, m_1, I_1) равняются:

$$\begin{aligned}
 A_0 &= 27,09 \text{ м}^2, & m_0 &= A_0 \gamma / g = 5,522 \text{ тс}^2/\text{м}^2, \\
 A_1 &= 47,38 \text{ м}^2, & m_1 &= A_1 \gamma / g = 9,659 \text{ тс}^2/\text{м}^2, \\
 I_0 &= 229,4 \text{ м}^4, & I_1 &= 9692,8 \text{ м}^4.
 \end{aligned}
 \tag{а}$$

Обобщенные массы, входящие в левую и правую части дифференциального уравнения (10) при высоте сооружения $l = 120$ м, получаются соответственно равными:

$$\begin{aligned}
 m^* &= 0,06406 \times m_1 l + 0,2268 \times m_0 l = 224,5 \text{ тс}^2/\text{м}, \\
 \bar{m} &= 0,005475 m_1 l + 0,3634 m_0 l = 247,2 \text{ тс}^2/\text{м}, \\
 \mu &= \bar{m} / m^* = 1,101.
 \end{aligned}
 \tag{б}$$

Обобщенные коэффициенты жесткости, соответствующие изгибу и сжатию сооружения при $l = 120$ м, $E = 2 \times 10^6$ т/м, $\gamma = 2$ т/м³, получаются равными:

$$\begin{aligned}
 k_M^* &= \pi^3 (0,4167 E I_1 + 0,7854 E I_0) = 18926,8 \text{ т/м}, \\
 k_N^* &= 0,6168 (A_0 + A_1) \gamma = 91,85 \text{ т/м}, \\
 k^* &= k_M^* - k_N^* = 18834,95 \text{ т/м}.
 \end{aligned}
 \tag{в}$$

Следовательно, частота и период свободных колебаний сооружения

$$\omega = \sqrt{k^*/m^*} = 9,18 \text{ рад/с}, T = 2\pi/\omega = 0,68 \text{ с.} \tag{Г}$$

На основе разработанной программы на языке FORTRAN получены результаты как методом численного дифференцирования, так и методом численного интегрирования. Вначале, на основе (20)–(23), были исследованы свободные колебания сооружения. На рис. 3 показаны графики изменения перемещения w_A и w_L , полученные от действия мгновенного импульса при $\tau = \frac{\Delta t}{4} = 0,005 \text{ с}$ и $\xi = 0,05$.

Из этих графиков следует, что период колебаний, полученный численным решением, совпадает с результатом (г).

На втором этапе на основе метода последовательных аппроксимаций исследуются колебания сооружения от действия землетрясения, представленного в виде заданной акселерограммы El Centro. На рис. 4 сравнивается ускорение, полученное для верхней точки сооружения, с графиком ускорения самого землетрясения. Видно, что относительное ускорение сооружения более чем в два раза превышает ускорение его основания.

Получены также результаты с применением алгоритма (28)–(30) и численного решения интеграла Дюамеля при $\tau = \frac{\Delta t}{2} = 0,01 \text{ с}$ и $\xi = 0,05$. На рис. 5 для сопоставления приводятся аналогичные рис. 4 графики, полученные численным интегрированием. Можно заметить, что пиковые ускорения второго метода (рис. 5) несколько меньше, чем в первом методе (рис. 4), хотя характер изменения по времени практически совпадает. По-видимому, это объясняется тем, что шаг по времени в первом методе в два раза меньше, чем во втором.

На рис. 6 приведены графики перемещения верхней точки сооружения, полученные по первому (рис. 6а) и второму методам (рис. 6б). Сравнение показывает их практическое совпадение.

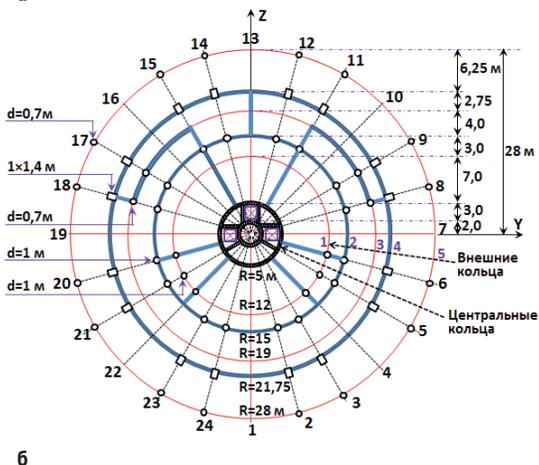
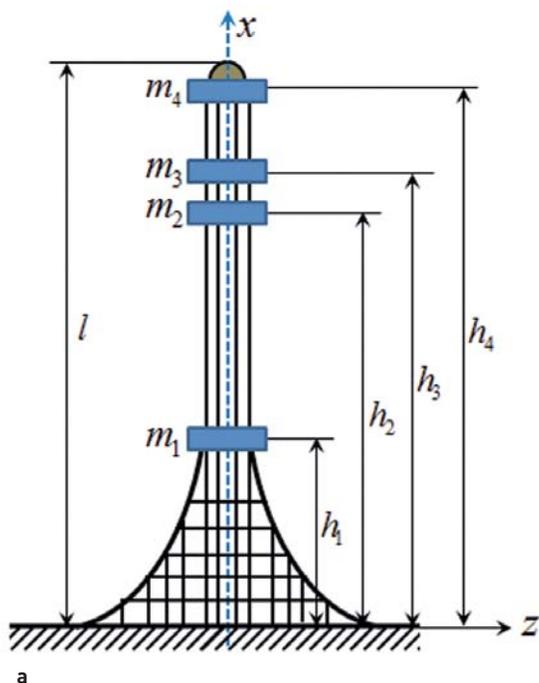


Рис. 2. Геометрия исследуемого сооружения
Fig. 2. Geometry of the investigated structure



Рис. 3. Графики свободных колебаний
Fig. 3. Graphs of free vibrations



Рис. 4. Относительное ускорение верхней точки сооружения (численное дифференцирование)
Fig. 4. Relative acceleration of the top point of the structure (numerical differentiation)



Рис. 5. Относительное ускорение верхней точки сооружения (численное интегрирование)
Fig. 5. Relative acceleration of the top point of the structure (numerical integration)

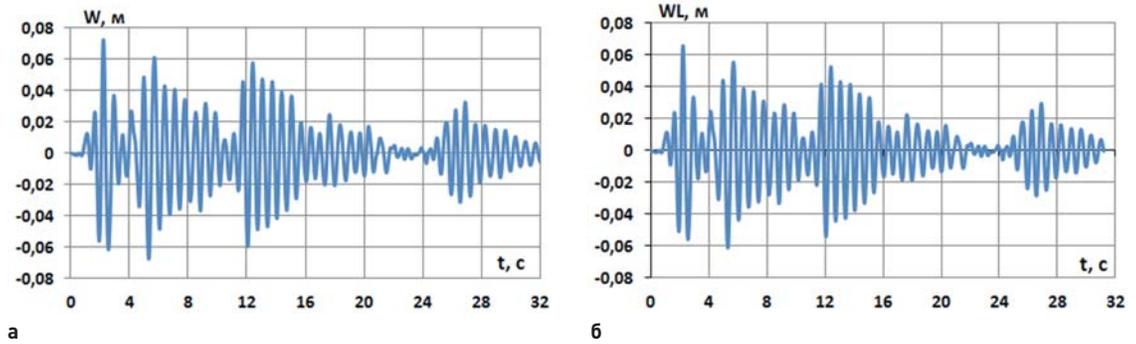


Рис. 6. Сравнение результатов по перемещениям, полученным двумя методами
 Fig. 6. Comparison of displacement results obtained by the two methods

Вывод

Разработаны алгоритмы и компьютерные программы, которые позволяют исследовать динамические процессы, связанные с напряженно-деформированным состоянием сооружения, которое представляется в виде обобщенной системы, при различных воздействиях. Достоверность результатов подтверждается сравнением результатов, полученных двумя методами. Разработанные компьютерные программы могут быть использованы для проведения мониторинга уникальных объектов башенного типа.

Список литературы

1. Клейн Г.К., Рекач В.Г., Розенблат Г.И. Руководство к практическим занятиям по курсу строительной механики. Москва: Высшая школа; 1972.
2. Артоболевский И.И., Боголюбов А.Н., Болотин В.В., Волоховский В.Ю., Жинжер Н.И., Мишенков Г.В. Вибрации в технике. Справочник. Т. 1. Колебания линейных систем. Москва: Машиностроение; 1978.
3. Бидерман В.Л. Прикладная теория механических колебаний. Москва: Высшая школа; 1972.
4. Никитин Н.Н. Курс теоретической механики. Москва: Высшая школа; 1990.
5. Светлицкий В.А., Стасенко И.В. Сборник задач по теории колебаний. Москва: Высшая школа; 1973.
6. Яблонский А.А., Норейко С.С. Курс теории колебаний. Москва: Высшая школа; 1975.
7. Клаф Р., Пензиен Дж. Динамика сооружений. Москва: Стройиздат; 1979.
8. Двайт Г.Б. Таблицы интегралов и другие математические формулы. Москва: Наука; 1973.
9. Низомов Д.Н. Численные методы решения динамических задач строительной механики. Изв. АН Респ. Тадж. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 1993;(1):62–72.
10. Низомов Д.Н. Методы прямого интегрирования дифференциальных уравнений движения дискретных систем. В: Строительство и архитектура: сб. науч. тр. Таджикского технического университета. Душанбе: ТТУ; 1992. Вып. 2, с. 39–46.
11. Низомов Д.Н. Метод граничных уравнений в решении статических и динамических задач строительной механики. Москва: Изд-во АСВ; 2000.
12. Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К. Метод сосредоточенных деформаций. Душанбе: Дониш; 2015.
13. Дарков А.В., Шапиро Г.С. Сопrotивление материалов. Москва: Высшая школа; 1969.

References

1. Klein G.K., Rekach V.G., Rozenblat G.I. Guide to practical training in the course of structural mechanics. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1972. (In Russian).
2. Artobolevskii I.I., Bogolyubov A.N., Bolotin V.V., Volokhovskii V.Yu., Zhinzher N.I., Mishenkov G.V. Vibrations in technology. Vol. 1. Oscillations of linear systems. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1978. (In Russian).
3. Biderman V.L. Applied theory of mechanical vibrations. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1972. (In Russian).
4. Nikitin N.N. Course of theoretical mechanics. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1990. (In Russian).
5. Svetlitskii V.A., Stasenko I.V. Collection of problems on the theory of oscillations. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1973. (In Russian).
6. Yablonskii A.A., Noreiko S.S. Oscillation theory course. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1975. (In Russian).
7. Klaf R., Penzien J. Dynamics of structures. Moscow: Stroizdat Publ.; 1979. (In Russian).
8. Dwight H.B. Tables of integrals and other mathematical data. Moscow: Nauka Publ.; 1973.
9. Nizomov D.N. Numerical methods for solving dynamic problems of structural mechanics. Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadjikistan. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh i tekhnicheskikh nauk = News of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of physical, mathematical, chemical, geological and technical sciences. 1993;(1):62–72. (In Russian).
10. Nizomov D.N. Methods of direct integration of differential equations of motion of discrete systems. In: Construction and architecture. Collection of scientific works of the Tajik Technical University. Dushanbe: Tajik Technical University; 1992. Issue 2, pp. 39–46. (In Russian).
11. Nizomov D.N. Method of boundary equations in solving static and dynamic problems of structural mechanics. Moscow: Publishing House ASV; 2000. (In Russian).
12. Nizomov D.N., Kalandarbekov I.K. Method of concentrated deformations. Dushanbe: Donish Publ.; 2015. (In Russian).
13. Darkov A.V., Shapiro G.S. Strength of materials. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1969. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Джахонгир Низомович Низомов, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент НАНТ, заведующий лабораторией сейсмостойкости зданий и сооружений Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, Душанбе

e-mail: tiees@mail.ru

Djahongir N. Nizomov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of NAST, Head of the Laboratory of Earthquake Resistance of Buildings and Structures, Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology of the NAST, Dushanbe

e-mail: tiees@mail.ru

Абдусамад Мирвафоевич Сангинов[✉], канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмостойкости зданий и сооружений Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, Душанбе

e-mail: samad80@mail.ru

Abdusamad M. Sanginov[✉], Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Laboratory of Earthquake Resistance of Buildings and Structures, Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology of the NAST, Dushanbe

e-mail: samad80@mail.ru

Муродбек Мухтор Саломзода, директор государственного унитарного предприятия «Научно-исследовательский институт «Строительство и архитектура» (ГУП «НИИСА») Комитета по архитектуре и строительству при Правительстве Республики Таджикистан, Душанбе

e-mail: murodbek_sm@mail.ru

Murodbek Mukhtor Salomzoda, Director of the State Unitary Enterprise “Research Institute “Construction and Architecture” of the Committee on Architecture and Construction under the Government of the Republic of Tajikistan, Dushanbe

e-mail: murodbek_sm@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 699.941, 624.07, 699.81

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-49-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-49-60)

EDN: GBCSPI

ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НЕОБХОДИМЫХ ПРЕДЕЛОВ ОГНЕСТОЙКОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОМЕЩЕНИЙ АЭС С ПРИМЕНЕНИЕМ ПОЛЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОЖАРА

Д.И. ПУЦЕВ¹, д-р техн. наукС.Ю. МИШИНА²Ю.М. ГРОШЕВ², канд. техн. наук

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

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

Аннотация

Введение. В данной статье представлен методический подход к обоснованию мероприятий по обеспечению необходимых пределов огнестойкости ограждающих конструкций помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара. Подходы к обоснованию пожарной безопасности рассмотрены на примере помещения промсклада топлива резервной дизельной электростанции АЭС.

Цель работы: разработка и детальная проработка методического подхода к обоснованию мероприятий по обеспечению необходимых пределов огнестойкости ограждающих конструкций помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара.

Материалы и методы. Проведен анализ назначения и области применения различных методов моделирования динамики развития и распространения опасных факторов пожара. Моделирование пожара для обоснования мероприятий по обеспечению необходимых пределов огнестойкости ограждающих конструкций рассмотрено на примере помещения промсклада топлива резервной дизельной электростанции 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. Были проведены расчеты и проанализированы полученные результаты для наиболее опасных сценариев развития пожара на примере конкретного типичного помещения АЭС, относящегося к системе аварийного снабжения АЭС. Были учтены требования по резервированию данных систем для обеспечения устойчивости к отказам в системах при технологических отказах и внешних воздействиях на эти системы.

Выводы. Полевой метод является наиболее универсальным из существующих детерминистических методов, поэтому он широко может использоваться для определения/уточнения требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкций помещений АЭС. Применение полевой модели динамики пожара для проведения расчетов опасных факторов пожара возможно в различных зданиях и помещениях. Особенно эффективно применение полевой модели динамики пожара подходит для обоснования достаточности предъявляемых требований по огнестойкости строительных конструкций исходя из обеспечения нераспространения пожара за пределы пожарной зоны в течение расчетного времени выгорания всей

пожарной нагрузки. Полученные закономерности могут быть использованы при разработке/уточнении нормативных документов по обеспечению пожарной безопасности действующих и строящихся АЭС.

Ключевые слова: полевой метод моделирования пожара, огнестойкость ограждающих конструкций, комплекс программного обеспечения

Для цитирования: Пуцев Д.И., Мишина С.Ю., Грошев Ю.М. Обоснование мероприятий по обеспечению необходимых пределов огнестойкости ограждающих конструкций помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):49–60. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-49-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-49-60)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

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

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.01.2024

Поступила после рецензирования 16.02.2024

Принята к публикации 22.02.2024

JUSTIFICATION OF MEASURES AIMED AT ENSURING THE REQUIRED FIRE RESISTANCE OF STRUCTURES ENCLOSING NPP PREMISES USING CFD FIRE MODELING

D.I. PUTSEV¹, Dr. Sci. (Engineering)

S.Yu. MISHINA²

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

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

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

Abstract

Introduction. The article presents a methodological approach to justifying measures designed to ensure the required fire resistance of structures enclosing NPP premises with the use of CFD (computational fluid dynamics) fire modeling. Approaches to justifying fire safety are considered using the fuel storage facility of an NPP standby diesel power plant as an example.

Aim. To develop and analyze the methodological approach to justifying measures designed to ensure the required fire resistance of structures enclosing NPP premises with the use of CFD fire modeling.

Materials and methods. The purpose and application scope of various methods for modeling fire dynamics was analyzed. Fire modeling used to justify measures for ensuring the required fire resistance of enclosing structures was considered using the fuel storage facility of an NPP standby diesel power plant as an example.

Results. The performed analysis of different methods for modeling fire dynamics shows the possibility of using different fire simulation methods in the analysis of the fire hazard of buildings and facilities. The most dangerous fire development scenarios were modeled and the obtained results were analyzed on the example of a specific typical NPP facility in the NPP emergency power supply system. The redundancy requirements

for these systems were taken into account to ensure tolerance to system failures in case of process failures and external effects on these systems.

Conclusion. Since the CFD method is the most universal of the existing deterministic methods, it can be widely used to determine/revise the requirements for fire resistance of load-bearing and enclosing structures at NPP premises. It is possible to apply CFD-based fire modeling for the fire hazard of various buildings and facilities. This model is particularly effective in justifying the sufficiency of fire resistance requirements established for structures to prevent the spread of fire beyond the fire zone within the estimated burnout time of the entire fire load. The obtained regularities can be used in the development/revision of regulatory documents on fire safety at operating NPPs and NPPs under construction.

Keywords: CFD fire modeling, fire resistance, enclosing structures, software package

For citation: Putsev D.I., Mishina S.Yu., Groshev Yu.M. Justification of measures aimed at ensuring the required fire resistance of structures enclosing NPP premises using CFD fire modeling. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):49–60. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-49-60](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-49-60)

Author contribution statements

All the authors have contributed equally to the publication.

Funding

The study was supported by VNIPO EMERCOM of Russia, Scientific and Technical Centre "Industrial and Fire Safety", and JSC Atomenergoproekt (Moscow).

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 20.01.2024

Revised 16.02.2024

Accepted 22.02.2024

Введение

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

Целью статьи является анализ особенностей расчета пределов огнестойкости строительных конструкций основных зданий АЭС с учетом различий в объемно-планировочных и конструктивных решениях, а также специфики находящейся в зданиях горючей нагрузки. Для этого были проведены расчеты и проанализированы полученные результаты для наиболее опасных сценариев развития пожара на примере конкретного помещения АЭС, относящегося к системе аварийного электроснабжения (далее – САЭ), с учетом требования по резервированию данных систем для обеспечения устойчивости к отказам в системах при технологических отказах и внешних воздействиях на эти системы.

С целью выполнения данного требования предусматриваются:

- 1) дублирование элементов САЭ, выполняемое по канальному принципу, предусматривающему создание нескольких независимых каналов;
- 2) обеспечение физического разделения оборудования различных каналов при аварийных ситуациях, в том числе при пожарах.

Таким образом, аналитическое обоснование достаточности физического разделения каналов и разработка строительных, технологических и противопожарных мероприятий при пожарах на резервных дизельных электростанциях (далее – РДЭС) направлены на обеспечение ядерной и радиационной безопасности. При этом значительные запасы топлива в хранилищах требуют применения разработки специализированных мероприятий с учетом высокой интенсивности воздействия углеводородных пожаров на конструкции и больших величин пожарной нагрузки в помещениях хранилищ.

Подходы к обоснованию безопасности в настоящей статье будут рассмотрены на примере помещения промсклада топлива РДЭС блока № 1 Калининской АЭС.

Исходные данные по зданию и железобетонным конструкциям промежуточного склада топлива Калининской АЭС блока № 1:

- класс безопасности задания по НП-001-15 – 2;
- категория ответственности за ядерную безопасность по ПиН АЭ-5.6 – I;
- класс конструктивной пожарной ответственности – СО;
- класс функциональной пожарной опасности – Ф5.2;
- марка бетона – В25;
- класс арматуры – АIII (А400);
- защитный слой до грани арматурного стержня – 30 мм;
- толщина несущих стен из монолитного железобетона – 250 мм;
- толщина перекрытий из монолитного железобетона – 400 мм.

В помещении установлен промежуточный бак топлива емкостью 100 м³.

При расчетах используются следующие предположения условий пожара ГЖ:

- круговая модель распространения пожара. В качестве линейной скорости распространения пожара принята скорость распространения пламени по поверхности жидкости;
- скорость выгорания и удельная теплота сгорания приняты для дизельного топлива ЕВРО, сорт С, ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009) [1].

При анализе предполагалось несрабатывание системы пожаротушения вследствие отказа. При этом предполагается нормальная работа других независимых элементов противопожарной защиты, в том числе закрытое состояние дверей.

Расчеты выполняются для условно герметичных помещений. Такой режим пожара реализуется при двух условиях (ранее рассмотренное предположение условной герметичности помещения).

1. Пожар протекает при давлении, близком к давлению в соседних помещениях и окружающей среде, несмотря на интенсивный рост температуры (и давления в начале пожара) вследствие выдавливания или открытия заполнения проемов в помещениях.
2. Через вскрывшиеся проемы не происходит двустороннего газообмена (одновременного выхода продуктов горения и поступления кислорода окружающего воздуха).

Расчеты проводятся с использованием математической модели и программного кода Fire Dynamics.

Методики расчета локальных параметров пожара

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

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

а) интегральный метод:

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

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

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

б) зонный (зональный) метод:

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

В отличие от интегральных моделей зональный метод может использоваться для помещений большого объема, когда размер очага пожара существенно меньше размеров помещения; для рабочих зон, расположенных на разных уровнях в пределах одного помещения (наклонный зрительный зал кинотеатра, антресоли и т. д.).

в) полевой метод:

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

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

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

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

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

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

Таким образом, в случаях, когда требуется рассчитать локальные параметры развития пожара или применение строительных конструкций не позволяет использовать эмпирические или среднеобъемные модели для расчета динамики пожара, используется созданная во ФГБУ ВНИИПО МЧС России полевая модель. Это относится, прежде всего, к расчетам пожара в больших помещениях, помещениях с неравномерно распределенной пожарной

нагрузкой и сложным режимом газообмена, к задаче определения безопасных расстояний для оборудования систем безопасности. Данная модель создана с учетом требований и рекомендаций по применению методов полевого моделирования и предусматривает решение системы уравнений газодинамики и теплообмена с учетом моделирования процессов горения и переноса тепла излучением.

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

Критерии устойчивости конструкций к воздействию ОФП

В качестве критериев критического воздействия пожара на железобетонные конструкции приняты:

- 1) прогрев защитного слоя бетона до арматуры со стороны пожара до 500 °С. Критерий соответствует потере расчетного запаса прочности конструкции в зоне растяжения вследствие снижения предела прочности арматуры при прогреве;
- 2) прогрев необогреваемой стороны конструкции до 180 °С (с учетом расчета средних значений по нормальному сечению со стороны пожара).

Результаты расчета для помещений топливных баков

Результаты расчетов представлены на графиках (рис. 1–6) и в табл. 1.

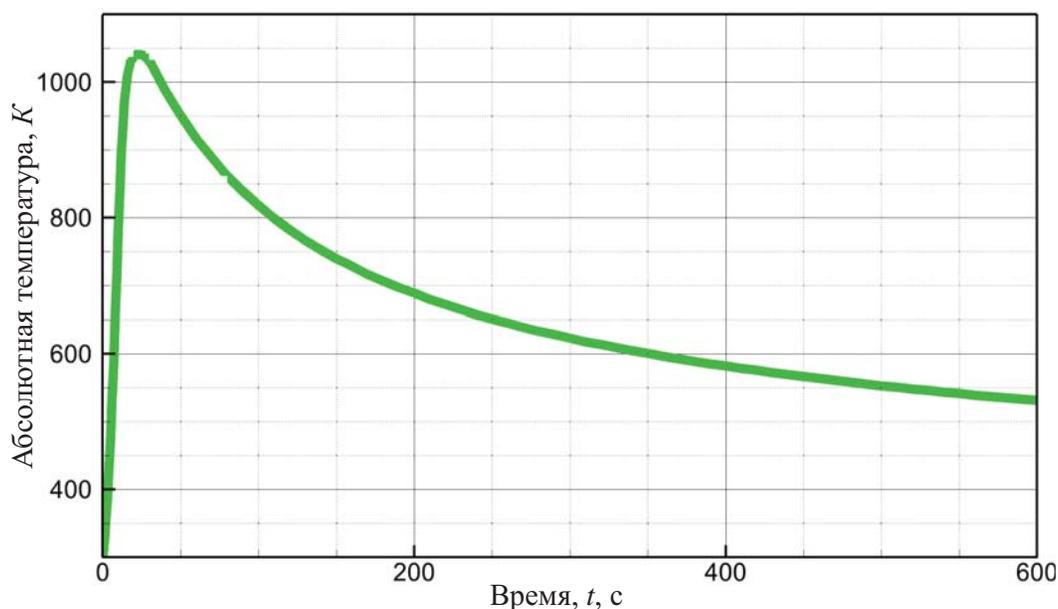


Рис. 1. Динамика среднеобъемной абсолютной температуры при пожаре в помещении бака, K
Fig. 1. Dynamics of volume-averaged absolute temperature in case of fire in the tank room, K

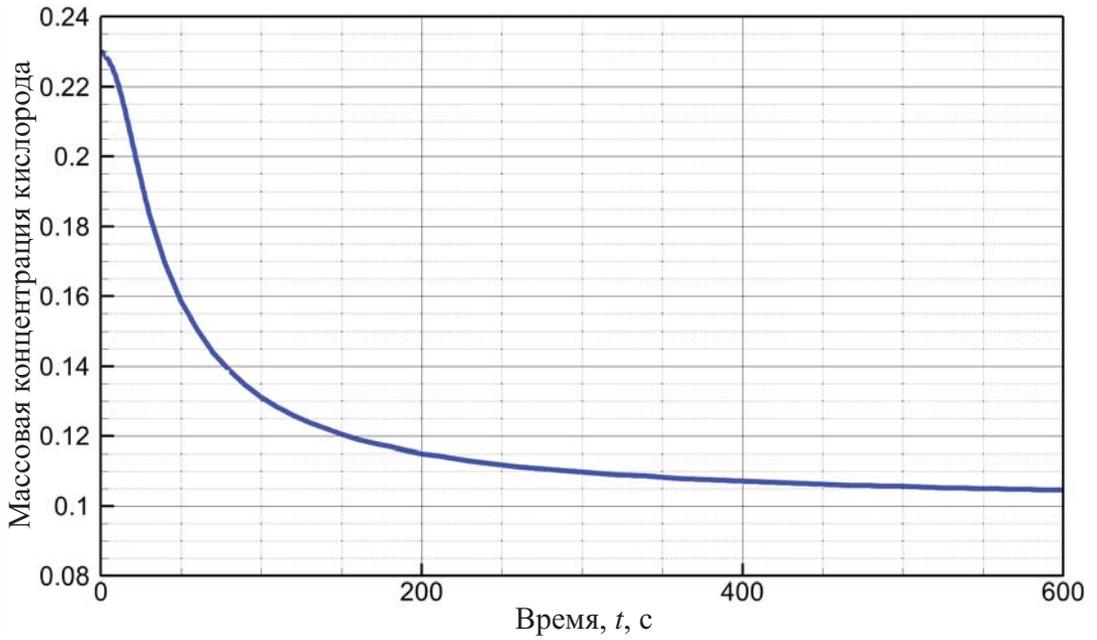


Рис. 2. Динамика изменения массовой концентрации кислорода
 Fig. 2. Dynamics of oxygen mass concentration

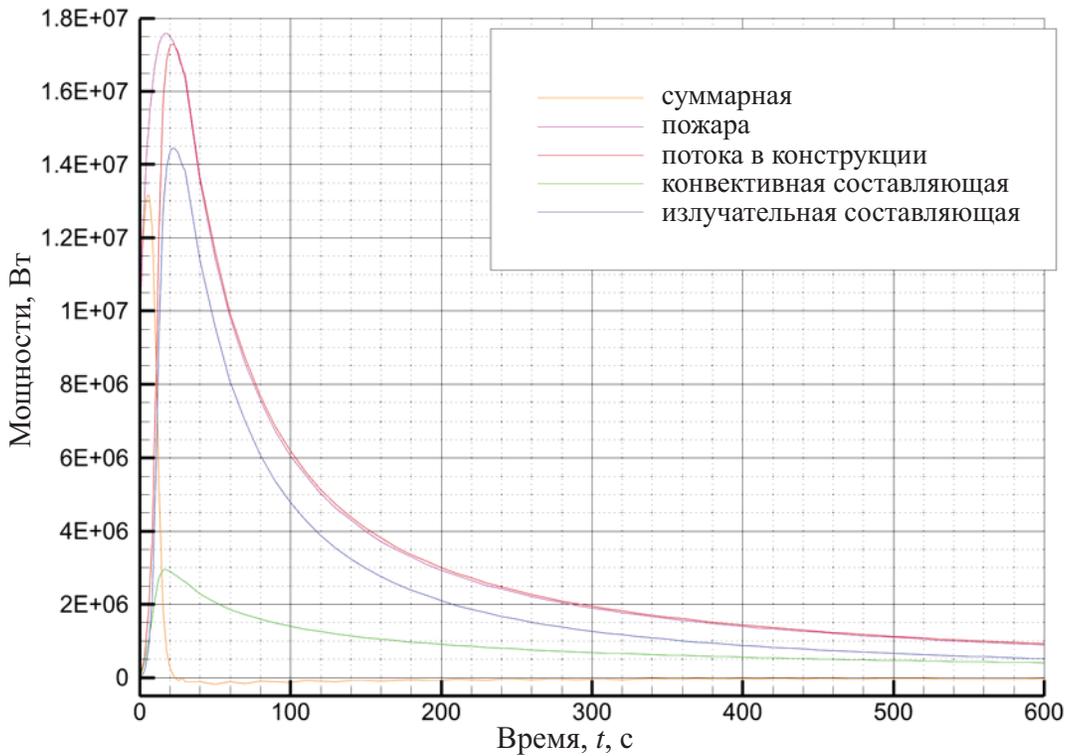


Рис. 3. Динамика изменения мощности энергетических потоков, Вт
 Fig. 3. Dynamics of power flow capacity, W

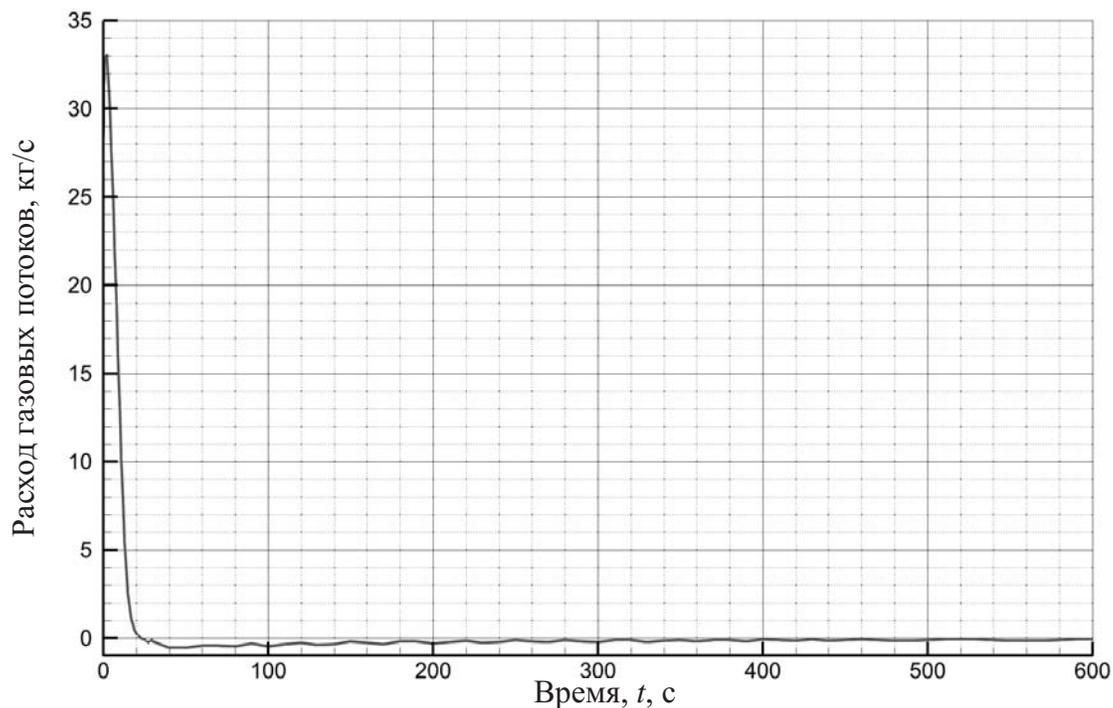


Рис. 4. Расход выходящего (входящего) через неплотности газового потока, кг/с
Fig. 4. Leak rate of outgoing (incoming) gas flow, kg/s

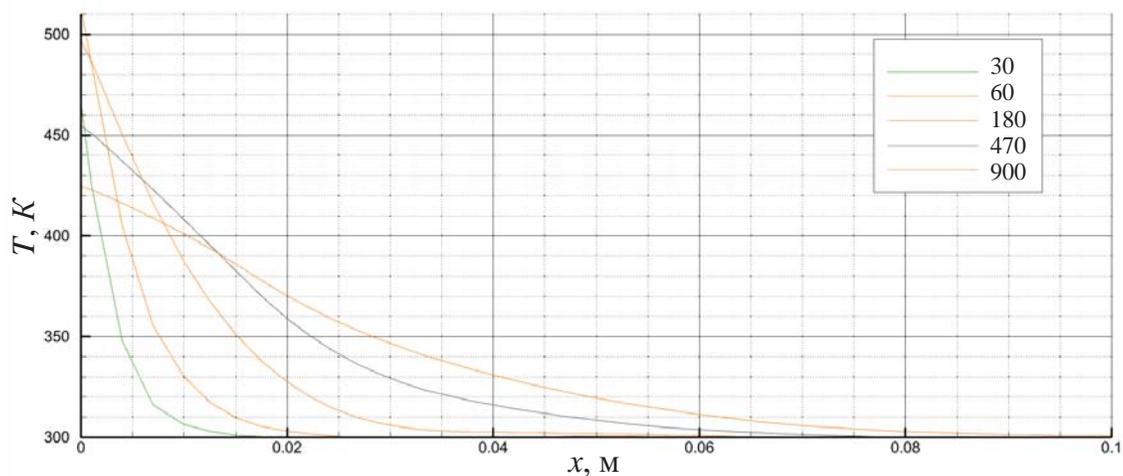


Рис. 5. Динамика распределения абсолютной температуры по сечению стены, K, время от начала пожара, с.
Слой со стороны обогреваемой поверхности
Fig. 5. Dynamics of absolute temperature distribution across the wall cross-section, K, time from fire outbreak, s. Layer on the heated surface side

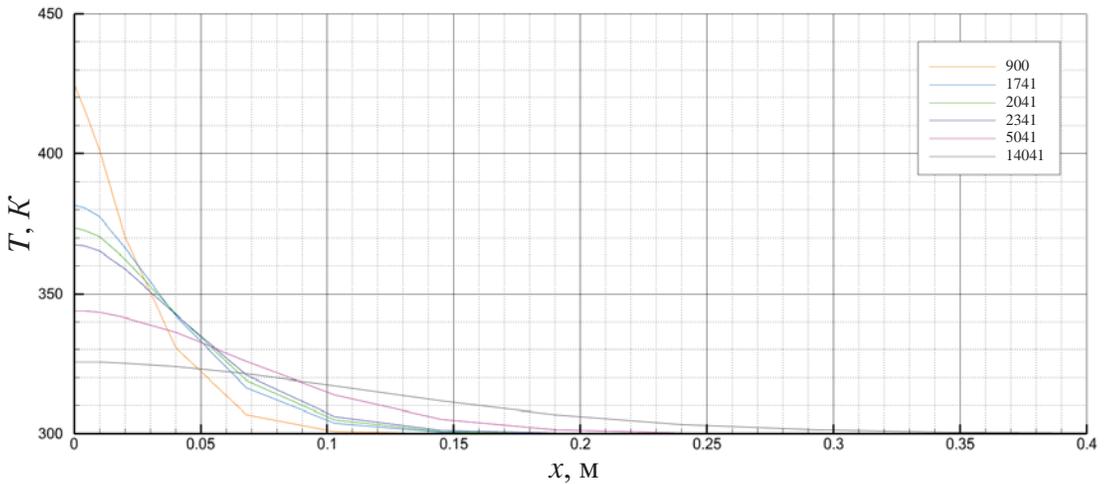


Рис. 6. Динамика распределения абсолютной температуры по сечению стены, К, время от начала пожара, с.
Полное сечение стены конструкции стены

Fig. 6. Dynamics of absolute temperature distribution across the wall cross-section, K, time from the fire outbreak, s.
Total cross-section of the wall structure

Таблица 1

Характерные величины термического воздействия ОФП на стеновые конструкции помещения топливного бака

Table 1

Characteristic thermal impact of dangerous fire factors on the fuel tank room walls

Наименование помещения	Категория	Максимальная температура поверхности, К	Время достижения максимальной температуры поверхности, с	Максимальная температура на глубине защитного слоя (30 мм), К	Время достижения максимальной температуры защитного слоя, с
Помещение бака топлива	B1	518	79	356	1632

Анализ результатов расчетов

Из результатов расчетов для помещения следует:

1. Наблюдается резкий рост среднеобъемной температуры в помещении вследствие быстрого распространения пламени по поверхности топлива и интенсивного возрастания площади горения. Максимальная температура достигается примерно через 25 секунд после начала пожара (рис. 1).

2. Максимальная избыточная температура ~1050 К – значительно ниже максимального значения температуры пламени при пожарах нефтепродуктов ~1380 °С (1650 К). В случае герметичности помещения давление за такой период времени возросло не менее чем в 3,6 раза (до 2,6 избыточной атмосферы).

3. После 25 секунд пожара начинается снижение среднеобъемной температуры вследствие снижения интенсивности пожара из-за уменьшения концентрации кислорода (рис. 2).

С этого момента теплотери в конструкции превышают мощность пожара, суммарная тепловая мощность для среды помещения становится отрицательной (рис. 3). Начинается остывание среды в помещении.

4. При остывании среды происходит приток свежего воздуха через неплотности, открытые или разгерметизированные заполнения проемов. Приток воздуха уменьшает интенсивность снижения мощности пожара, хотя общая мощность пожара продолжает снижаться. Мощность пожара и приток воздуха переходят при остывании в пульсирующий режим: приток – увеличение мощности/снижение притока – падение мощности после выгорания поступившего кислорода – остывание/увеличение притока (рис. 4). Данный пульсирующий режим неоднократно наблюдался при реальных пожарах и натурных экспериментах. Учет участия в горении кислорода из притока на фазе остывания имеет принципиальное значение при расчете динамики изменения параметров среды на стадии остывания.

5. На графиках (рис. 5–6) представлена динамика распределения температуры по сечению окружающих железобетонных конструкций стен помещения бака. Расчет показывает характерную особенность прогрева – прогрев тонкого слоя конструкции во время пожара и последующее распространение тепловой волны (распределение накопленного тепла) по толщине конструкции.

6. Максимальная избыточная температура прогрева поверхности стены 218 °С достигается через 79 секунд после начала пожара (рис. 6, табл. 1).

7. Максимальная избыточная температура на глубине защитного слоя (30 мм от обогреваемой поверхности) 56 °С достигается через 1632 секунд после начала пожара (рис. 6). Таким образом, с запасом выполнены определенные ранее требования к огнестойкости на основе выполнения 1-го критерия – прогрев защитного слоя и 2-го критерия – максимальная температура на необогреваемой стороне.

8. В предположении защитного слоя железобетонной конструкции не менее 15 мм для конструкции с REI60: максимальная избыточная температура защитного слоя ~90 °С (рис. 6). Для условной железобетонной строительной конструкции с REI60 также выполняются критерии 1 и 2 прогрева защитного слоя и необогреваемой стороны. Таким образом, требуемый предел огнестойкости – не более 60 мин.

Заключение

1. Применение полевой модели динамики пожара Fire Dynamics 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. Описан методический подход к определению требований к огнестойкости несущих и ограждающих конструкции помещений АЭС с применением полевого моделирования пожара.

2. Расчетный анализ динамики пожара в помещениях резервуаров топлива доказывает, что при обеспечении условной герметичности помещений требования к пределам огнестойкости строительных конструкций и заполнений проемов – не выше 60 мин. Таким образом, проектные пределы огнестойкости стен и заполнений проемов в этих стенах достаточны для обеспечения нераспространения пожара при обеспечении условной герметичности помещений резервуаров.

3. В связи с тем что ячейки промскладов имеют независимые системы вентиляции и смотровые люки в перекрытии помещений резервуаров топлива выходят непосредственно наружу, распространение ОФП между ячейками вследствие повышения давления при пожаре возможно только при повреждении дверей в стенах. Для ограничения роста давления при пожаре с целью обеспечения условий устойчивости дверей в стенах помещений резервуаров были рекомендованы дополнительные противопожарные мероприятия – устройство легкобрасываемых (открываемых) люков в конструкции перекрытия. Для гарантированного открытия при пожаре люки не должны иметь устройств запираения или должно быть обеспечено их открытое состояние организационно-техническими мероприятиями по пожарной безопасности.

4. При условии выполнения дополнительных противопожарных мероприятий для помещений резервуаров промежуточного топлива при пожаре в соответствии с п. 48 НП-087-11 [2] обеспечивается физическое разделение элементов САЭ, относящихся к разным каналам системы безопасности.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52368-2005 (ЕН 590:2009). Топливо дизельное евро. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2009.
2. НП-087-11. Требования к системам аварийного электроснабжения атомных станций [интернет]. Москва: ФБУ «НТЦ ЯРБ»; 2013. Режим доступа: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ca4/4293778301.pdf>
3. 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)
4. Применение полевого метода математического моделирования пожаров в помещениях: Методические рекомендации [интернет]. Москва: ВНИИПО; 2003. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808018.pdf>
5. Рекомендации по оценке пожароуязвимости систем (элементов), важных для безопасности, на Российских АЭС. Москва: ВНИИАЭС; 2000.
6. 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.
7. Кошмаров Ю.А., Пузач С.В., Андреев В.В., Козлов Ю.И. Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении. Москва: Академия ГПС МЧС России; 2012.
8. СП 13.13130.2009. Атомные станции. Требования пожарной безопасности. Москва: МЧС России; 2009.
9. Ingberg S.H. Tests of the Severity of Building Fires. NFPA Quarterly. 1928;22(1):43–61.
10. Методы расчета температурного режима пожара в помещениях зданий различного назначения. Рекомендации. Москва: ВНИИПО; 1988.
11. СП 468.1325800.2019. Бетонные и железобетонные конструкции. Правила обеспечения огнестойкости и огнесохранности. Москва: Стандартинформ; 2020.
12. Болодьян А.А., Глухов И.С., Пуцев Д.И. Математическое моделирование переноса газо-аэрозольных смесей в объеме помещения. Научно-техническое обеспечение противопожарных и аварийно-спасательных работ. Научно-техническое обеспечение противопожарных и аварийно-спасательных работ: Материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. Москва: ВНИИПО; 1993, с. 164–165.

References

1. State Standard R 52368-2005 [EN 590:2009]. Diesel fuel EVRO. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (In Russian).
2. NP-087-11. Requirements for emergency power supply systems of nuclear power plants [internet]. Moscow: SECNRS; 2013. Available at: <https://ohranatruda.ru/upload/iblock/ca4/4293778301.pdf> (In Russian).
3. *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)
4. Application of the field method of mathematical modeling of indoor fires: Methodological recommendations [internet]. Moscow: VNIPO; 2003. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293808/4293808018.pdf> (In Russian).
5. Recommendations for assessing the fire resistance of systems (elements) important for safety at Russian nuclear power plants. Moscow: VNIIAES; 2000. (In Russian).
6. *Molchadsky I.S., Zotov S.V.* Calculation of the required fire resistance limit and permissible fire load of reinforced concrete columns. In: Fire resistance of building structures: collection of scientific papers. Moscow: VNIPO; 1984, pp. 50–65. (In Russian).
7. *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).
8. SP 13.13130.2009. Nuclear Power Plants. Fire Safety Requirements. Moscow: Ministry of Emergency Situations of Russia; 2009. (In Russian).
9. *Ingberg S.H.* Tests of the Severity of Building Fires. NFPA Quarterly. 1928;22(1):43–61.
10. Methods for calculating the temperature regime of fire in buildings of various purposes. Recommendations. Moscow: VNIPO; 1988. (In Russian).
11. SP 468.1325800.2019. Concrete and reinforced concrete structures. Rules for ensuring of fire resistance and fire safety. Moscow: Standartinform; 2020. (In Russian).
12. *Bolodyan A.A., Glukhov I.S., Putsev D.I.* Mathematical modeling of the transfer of gas-aerosol mixtures in the volume of the room. Scientific and technical support of fire-fighting and rescue operations. In: Scientific and technical support of fire and rescue operations: Materials of the XII scientific and practical conference. Moscow: VNIPO; 1993, pp. 164–165. (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: ntcppb@mail.ru

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

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

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

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

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

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 699.8

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-61-69](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-61-69)

EDN: GMFZPL

ВЛИЯНИЕ ИНСОЛЯЦИОННОГО НАГРЕВА КРОВЛИ НА ЭКСПЛУАТАЦИОННУЮ НАДЕЖНОСТЬ ПОКРЫТИЯ

В.М. ТУСНИНА^{1,✉}, канд. техн. наук
А.А. ЕМЕЛЬЯНОВ², канд. техн. наук
Д.А. ЕМЕЛЬЯНОВ², канд. техн. наук

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

² *ООО «Научно-технический центр Инжиниринга», проспект Мира, д. 131, г. Москва, 129226, Российская Федерация*

Аннотация

Введение. В статье освещаются вопросы обеспечения эксплуатационной надежности совмещенных покрытий в части накопления в их конструкциях конденсационной влаги, вызывающей протечки в помещениях верхних этажей зданий. Работа актуальна тем, что такие проблемы вскрываются при обследовании зданий во время ремонтных работ и реконструкции. Течи в потолках помещений бесчердачных зданий обнаруживались в сухую солнечную погоду в условиях значительного нагрева кровли за счет солнечной радиации.

Цель: оценка влияния инсоляционного нагрева кровли на образование конденсата в совмещенном покрытии здания в летнее время года с учетом его конструктивного решения.

Материалы и методы. Приведены материалы по обследованию зданий в Московском регионе на предмет их ремонта и реконструкции, выявившие проблему образования протечек в совмещенных покрытиях зданий в сухие солнечные дни летнего времени года. Методом аналитического расчета исследован процесс влагопереноса через ограждающую конструкцию покрытия на примере конструктивного решения кровли обследованного объекта.

Результаты. В результате расчета влагопереноса определены сопротивления паропрооницанию, действительные и максимальные парциальные давления водяного пара и температуры на границах слоев исследуемых конструкций. Графическим методом выявлено изменение этих параметров в толще конструкций, показавшее, в каких местах образуется точка росы, свидетельствующая о возможном выпадении конденсата в ограждении. Для сравнительного анализа произведен расчет влагопереноса в аналогичной конструкции с заменой минераловатного утеплителя на экструдированный пенополистирол.

Выводы. 1. Результаты расчета влагопереноса в исследуемых конструкциях покрытий подтвердили факт возможности образования конденсата от инсоляционного нагрева кровли в летний период года. 2. Выбор конструктивного решения кровли при проектировании зданий должен осуществляться на основе точных тепловлажностных расчетов с учетом климатических особенностей района строительства, в том числе для летнего времени года.

Ключевые слова: нагрев, инсоляция, кровля, конденсат, паропрооницаемость, каменная вата

Для цитирования: Туснина В.М., Емельянов А.А., Емельянов Д.А. Влияние инсоляционного нагрева кровли на эксплуатационную надежность покрытия. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):61-69. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-61-69](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-61-69)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.12.2023

Поступила после рецензирования 22.12.2023

Принята к публикации 18.01.2024

EFFECT OF INSOLATION HEATING OF ROOF COVERINGS ON THEIR PERFORMANCE RELIABILITY

V.M. TUSNINA^{1,✉}, Cand. Sci. (Engineering)

A.A. EMELYANOV², Cand. Sci. (Engineering)

D.A. EMELYANOV², Cand. Sci. (Engineering)

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

² LLC "Scientific and technical center of engineering", prospekt Mira, 131, Moscow, 129226, Russian Federation

Abstract

Introduction. The article addresses the issues of ensuring the performance reliability of warm roofs in terms of condensation moisture accumulating in their structures, which causes leaks on the upper floors of buildings. Such problems are often revealed when buildings are inspected during repair and reconstruction works. Leaks in the ceilings of buildings with warm roofs were detected in dry, sunny weather with significant heating of the roof covering due to solar radiation.

Aim. To examine the effect of the insolation heating of a roof covering on the formation of condensate in the warm roof of a building in summer, taking into account its design solution.

Materials and methods. Materials are presented on inspection of buildings in the Moscow region for repair and reconstruction needs; they reveal the problem of leak formation in the warm roofs of buildings on dry, sunny summer days. The process of moisture transfer through the exterior covering was analyzed through analytical calculations using the roof design solution in the considered structure as an example.

Results. The calculation of moisture transfer yielded vapor transmission resistance, conventional true and maximum partial pressures of water vapor, as well as temperatures at the layer boundaries in the studied structures. Changes in these parameters across the thickness of structures were revealed via a graphical method, which showed where the dew point indicating possible condensation in the covering is formed. For a comparative analysis, moisture transfer was calculated for a similar design in which mineral wool insulation was replaced by extruded polystyrene.

Conclusions. 1. The calculations of moisture transfer in the examined covering designs confirmed the formation of condensate due to the insolation heating of the roof in summer. 2. The choice of a covering design solution in the design of buildings should be based on accurate heat and moisture calculations taking into account climatic conditions in the construction area, including for the summer season.

Keywords: heating, insolation, roof covering, condensate, vapor transmission, stone wool

For citation: Tushina V.M., Emelyanov A.A., Emelyanov D.A. Effect of insolation heating of roof coverings on their performance reliability. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):61–69. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-61-69](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-61-69)

Author contribution statements

All the authors have contributed equally to the publication.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 14.12.2023

Revised 22.12.2023

Accepted 18.01.2024

Введение

Совмещенные покрытия зданий являются сложными многослойными конструкциями, подвергающимися комплексу силовых и несиловых воздействий, влияющих на их эксплуатационную надежность [1–3]. К одной из разновидностей несиловых нагрузок относится солнечная радиация, вызывающая нагревание кровли в летнее время года до очень высокой температуры, особенно если гидроизоляционный слой кровли не имеет защитного покрытия из материалов светлых тонов, способных в некоторой степени отражать солнечную радиацию [4]. Кровельное покрытие темных цветов способно в солнечные летние дни нагреваться до +80 °С и выше. При этом если в конструкции кровли падение температуры будет более интенсивным, нежели падение упругости водяного пара, могут создаваться условия, которые вызовут конденсацию водяного пара в толще самой конструкции [5]. Такое увлажнение наружной ограждающей конструкции, которой является кровля, зависит от ее конструктивного решения и, в частности, от типа материалов, применяемых в качестве теплоизоляционного слоя. Сегодня в конструкциях совмещенных покрытий зданий широко используется легкий утеплитель из минеральной ваты, характеризующийся низким коэффициентом теплопроводности. Однако за счет капиллярно-пористой структуры такой утеплитель подвержен увлажнению, не только ухудшающему его теплотехнические свойства, но и температурно-влажностный режим конструкции кровли в целом, снижая ее эксплуатационную надежность.

Вопросам температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий посвящена работа [6], в которой рассматриваются теоретические основы расчета кинетики изменения потенциалов и коэффициентов тепло- и влагопереноса в зависимости от изменения температуры и влажности материалов на примере модели пористого тела. Полученные автором зависимости могут использоваться для расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий из капиллярно-пористых строительных материалов.

В работе [7] анализируются закономерности процесса влагопереноса в ограждающей конструкции, моделируя ее работу в эксплуатационных условиях. Приводится методика расчета, учитывающая движение воздуха в конструкции. Установлено, что нормативные методы измерения паропроницаемости сильно упрощены и требуют научного развития.

По результатам экспериментального исследования ограждающих конструкций, приведенным в работе [8], установлено, что стандартные методы определения паропрооницаемости не учитывают условия эксплуатации материалов в ограждающих конструкциях. Это может повлечь за собой ошибочность использования в расчетах коэффициентов паропрооницаемости из справочных таблиц. Результаты испытаний показали, что скорость паропроония увеличивается при ветровом воздействии, но зависит также от свойств материалов. Установлено, что гидрофильные характеристики материалов значительно влияют на их паропрооницаемость.

Как показали результаты экспериментальных исследований, приведенные в работе [9], паропрооницаемость теплоизоляционных материалов не является постоянной величиной и меняется в зависимости от влажности, температуры и расположения материальных слоев в конструкции ограждения.

Оценка влияния изменения паропрооницаемости материалов ограждающей конструкции под действием эксплуатационных нагрузок на ее температурно-влажностное состояние, результаты которой приведены в работе [10], доказывает необходимость учета переменного значения коэффициента паропрооницаемости на этапе проектирования наружных ограждающих конструкций. По результатам проведенных исследований установлено, что общая паропрооницаемость конструкции зависит от теплопроводности ее отдельных слоев, которая способна изменить в них эксплуатационную относительную влажность. Особо подчеркнуто существенное влияние учета переменного значения паропрооницаемости на количественную оценку влажностного состояния ограждающей конструкции.

В работе [11] показана необходимость учета диффузии парообразной влаги при проектировании теплозащиты ограждающих конструкций. По результатам данного исследования установлено, что, изменяя теплопередачу и паропрооницаемость отдельных слоев и их взаиморасположение в ограждающей конструкции, можно исключить накопление в них парообразной и конденсированной влаги.

С проблемой накопления конденсированной влаги в ограждающих конструкциях совмещенных покрытий в виде протечек достаточно часто встречаются при обследовании зданий на предмет их ремонта и реконструкции. Специалистами ООО «Научно-технический центр Инжиниринга» при обследовании зданий в Московском регионе с целью выявления причин образования протечек покрытий в период сухих солнечных летних дней было установлено, что в утеплителе из каменной ваты накапливалась конденсированная влага, которая протекала в помещения через швы железобетонных плит покрытия (рис. 1). При этом в кровлях с теплоизоляцией из пеноплекса, обладающего меньшим коэффициентом паропрооницаемости, таких проблем не наблюдалось.

Минераловатный утеплитель сегодня широко применяется в качестве эффективной теплоизоляции в ограждающих конструкциях зданий, в том числе и в совмещенных покрытиях с рулонной кровлей. Проектирование покрытий с утеплением каменной ватой на объектах капитального строительства, как правило, выполняется по типовым техническим решениям той или иной кровельной системы. Типовые конструктивные решения совмещенных покрытий с утеплителем из каменной ваты предусматривают защитный слой от солнечной радиации в виде светоотражающих посыпок, а для проветривания утеплителя – установку на кровле аэраторов. Как показали обследования причин возникновения протечек с кровель, имеющих такие конструктивные решения, данные методы защиты не всегда эффективны.



а



б

Рис. 1. Совмещенное покрытие обследуемого объекта: а – фрагмент кровли с аэратором; б – фрагмент вскрытого потолка в месте протечки

Fig. 1. Warm roof of the examined structure: а – fragment of the roof covering with an aerator; б – fragment of the ceiling exposed in the place of leakage

Цель работы – исследование влияния инсоляционного нагрева кровли на образование конденсата в совмещенном покрытии здания в летнее время года.

Материалы исследования

Исследование процесса влагопереноса через ограждающую конструкцию покрытия методом аналитического расчета производилось на примере конструктивного решения кровли обследованного объекта, в котором в качестве теплоизоляции была применена каменная вата (вар. 1). Для сравнительного анализа был произведен расчет влагопереноса в аналогичной конструкции с заменой минераловатного утеплителя на экструдированный пенополистирол (вар. 2) (рис. 2). Расчетные теплотехнические показатели материалов слоев исследуемых конструкций приведены в табл. 1.

Расчет выполнен для климатических условий г. Москвы в летний период года для дней с максимальной солнечной радиацией

Техноэласт 4 мм
Унифлекс 4 мм
Цементно-песчаный раствор 50 мм
Рубероид 4 мм
Каменная вата 150 мм (вар. 1)
Пенополистирол 150 мм (вар. 2)
Биполь ЭПП 4 мм
Железобетон 220 мм

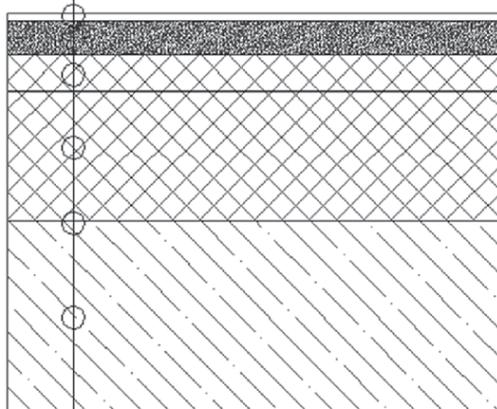


Рис. 2. Исследуемая конструкция покрытия
Fig. 2. Analyzed design of the covering

Таблица 1

Расчетные теплотехнические показатели материалов слоев конструкции

Table 1

Estimated thermal performance of layer materials in the structure

№ слоя	Материал	Расчетные характеристики материалов		
		Толщина, δ, м	Коэффициент теплопроводности, λ, Вт/(м×°С)	Коэффициент паропроницаемости, μ, мг/(м×ч×Па)
1	Техноэласт	0,004	0,17	0,0014
2	Унифлекс	0,004	0,17	0,0014
3	Цементно-песчаный раствор	0,05	0,76	0,09
4	Рубероид (ГОСТ 10923-93 [12])	0,004	0,17	0,0014
5	Каменная вата Технорф Н30 (вариант 1)/ Пенополистирол (вариант 2)	0,15	0,041/0,032	0,3/0,015
6	Биполь ЭПП	0,004	0,17	0,0014
7	Железобетон (ГОСТ 26633-2015 [13])	0,22	2,04	0,03

с учетом нагрева кровельного покрытия до +80 °С. Температурно-влажностные характеристики внутреннего и наружного воздуха приняты: $t_{в} = +18$ °С; $\phi_{в} = 50\%$; $t_{н} = +80$ °С; $\phi_{н} = 70\%$.

Расчет на конденсацию влаги в исследуемых конструкциях производился графическим методом в соответствии с требованиями СП 50.13330.2012 [14], СП 131.13330.2020 [15], СП 23-101-2004 [16].

Для этого определялись: сопротивление паропроницанию R , действительные и максимальные парциальные давления водяного пара e_i и E_i соответственно и температуры t_i на границах слоев конструкции (табл. 2).

По результатам расчета построены графики изменения температуры t , действительного e и максимального E парциальных давлений в толще исследуемых конструкций (рис. 3).

Таблица 2

Результаты расчета

Table 2

Calculation results

№ слоя	Вариант № 1 (утеплитель – каменная вата)			Вариант № 2 (утеплитель – пенополистирол)		
	$t, ^\circ\text{C}$	$e, \text{Па}$	$E, \text{Па}$	$t, ^\circ\text{C}$	$e, \text{Па}$	$E, \text{Па}$
1	19,65	2320,0	1022,0	19,65	2320,0	1022,0
2	21,23	2420,0	10453,6	21,23	2420,0	6530,3
3	21,38	2560,0	15866,4	21,38	2560,0	8868,4
4	27,00	3706,0	79571,3	27,00	3706,0	9912,5
5	74,17	38589,0	15893,8	74,17	38589,0	48996,7
6	78,34	45402,0	16183,3	78,34	45402,0	9811,4
7	78,92	46340,0	231093,4	78,92	46340,0	133249,1

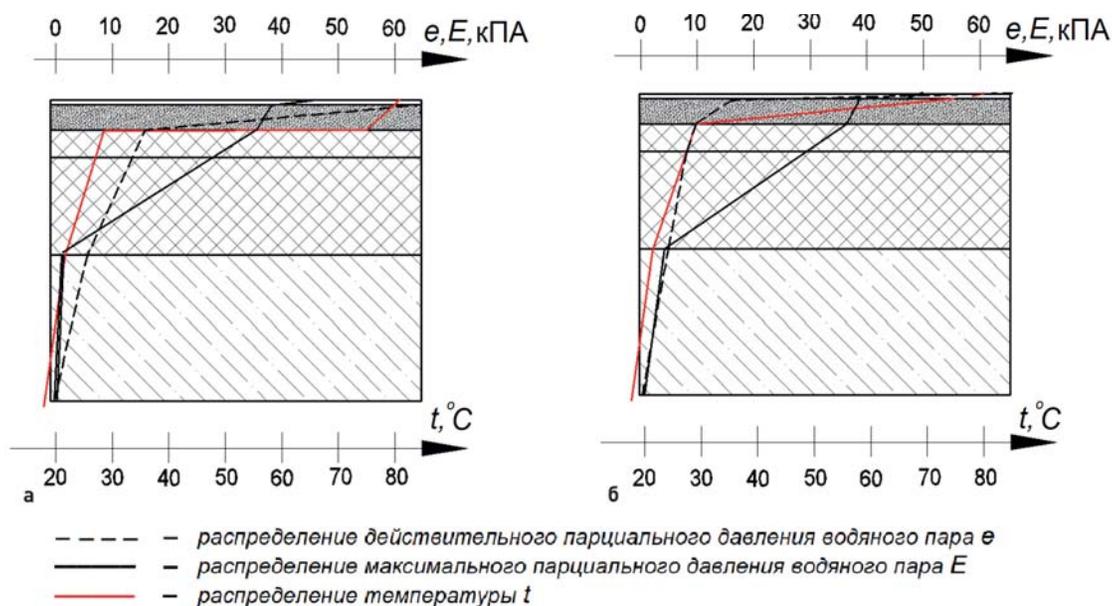


Рис. 3. Графики изменения температуры и парциальных давлений в толще исследуемых конструкций с утеплителем из каменной ваты (а) и пенополистирола (б)

Fig. 3. Graphs showing changes in temperature and partial pressures across the thickness of examined structures having stone wool (a) and extruded polystyrene insulation (b)

На рис. 3 видно, что кривые действительного и максимального парциальных давлений пересекаются, что свидетельствует о том, что в обоих вариантах конструкций в местах пересечения этих кривых образуется точка росы, определяющая возможность выпадения конденсата. При этом следует отметить, что в конструкции с теплоизоляцией из минеральной ваты выпадение конденсата осуществляется в толще утеплителя, а с утеплителем из пенополистирола – на границе с пароизоляцией. Объясняется это тем, что пенополистирол обладает гораздо меньшим коэффициентом паропроницаемости, чем минераловатные плиты (табл. 1), и не накапливает влагу в процессе эксплуатации здания, как это происходит с каменной ватой. Поэтому в кровлях, где в качестве утеплителя применяется паропроницаемый утеплитель, способный накапливать влагу в течение определенного времени, образуются протечки в покрытии.

Выводы

1. Результаты расчета влагопереноса в исследуемых конструкциях покрытий подтвердили факт возможности образования конденсата от инсоляционного нагрева кровли в летний период года.
2. Выбор конструктивного решения кровли при проектировании зданий должен осуществляться на основе точных тепловлажностных расчетов с учетом климатических особенностей района строительства, в том числе для летнего времени года.

Список литературы

1. Лукинский О.А. Кровли плоских крыш – национальное бедствие. Монтажные и специальные работы в строительстве. 2013;(5):12–14.
2. Зернов А.Е. Надежность плоской кровли. Строительные материалы. 2006;(5):13–14.
3. Лукинский О.А. Плоские кровли: достоинства и недостатки. Строительные материалы. 2006;(5):6–10.
4. Филонов В.В. Разумный выбор материалов поможет избежать протечек кровли. Строительство: новые технологии, новое оборудование. 2014;(5):38–40.
5. Фокин К.Ф. Строительная теплотехника ограждающих частей зданий. Москва: АБОК-ПРЕСС; 2006.
6. Перехоженцев А.Г. Теоретические основы и методы расчета температурно-влажностного режима ограждающих конструкций зданий. Волгоград: ВолГАСУ; 2008.
7. Куприянов В.Н., Петров А.С. Паропроницаемость материалов в условиях, приближенных к эксплуатационным. Известия КГАСУ. 2013;(2):126–131.
8. Куприянов В.Н. Влияние различной скорости движения воздуха на паропроницаемость теплоизоляционных материалов. Строительные материалы. 2013;(6):20–21.
9. Куприянов В.Н., Петров А.С. Влияние температурно-влажностных условий эксплуатации строительных материалов на их паропроницаемость. Известия КГАСУ. 2015;(1):92–97.
10. Петров А.С., Куприянов В.Н. Переменное значение паропроницаемости материалов в условиях эксплуатации и его влияние на прогнозирование влажностного состояния ограждающих конструкций. Academia. Архитектура и строительство. 2016;(2):97–105.
11. Куприянов В.Н., Сафин И.Ш. Проектирование ограждающих конструкций с учетом диффузии и конденсации парообразной влаги. Известия КГАСУ. 2011;(1):93–103.
12. ГОСТ 10923-93. Рубероид. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 1994.
13. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2019.
14. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. Москва: Минрегион России; 2012.
15. СП 131.13330.2020. Строительная климатология. Москва: Стандартинформ; 2019.
16. СП 23-101-2004. Проектирование тепловой защиты зданий. Москва; 2004.

References

1. Lukinsky O.A. Roofs of flat roofs – a national disaster. Montazhnyye i spetsial'nyye raboty v stroitel'stve, 2013;(5):12–14. (In Russian).
2. Zernov A.E. Reliability of a flat roof. Stroitel'nyye materialy = Construction Materials. 2006;(5):13–14. (In Russian).
3. Lukinsky O.A. Flat roofs: advantages and disadvantages. Stroitel'nyye materialy = Construction Materials. 2006;(5):6–10. (In Russian).
4. Filonov V.V. A reasonable choice of materials will help avoid roof leaks. Stroitel'stvo: novyye tekhnologii, novoye oborudovaniye. 2014;(5):38–40. (In Russian).
5. Fokin K.F. Construction heating engineering of building envelopes. Moscow: ABOK-PRESS Publ.; 2006. (In Russian).
6. Perekhzhentsev A.G. Theoretical foundations and methods for calculating the temperature and humidity conditions of building envelopes. Volgograd: VolGASU Publ.; 2008. (In Russian).
7. Kupriyanov V.N., Petrov A.S. Vapor permeability of materials in conditions close to operational. Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2013;(2):126–131. (In Russian).
8. Kupriyanov V.N. The influence of different air speeds on the vapor permeability of heat-insulating materials. Stroitel'nyye materialy = Construction Materials. 2006;(6):20–21. (In Russian).
9. Kupriyanov V.N., Petrov A.S. The influence of temperature and humidity operating conditions of building materials on their vapor permeability. Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2015;(1):92–97. (In Russian).
10. Petrov A.S., Kupriyanov V.N. Variable value of vapor permeability of materials under operating conditions and its influence on predicting the humidity state of enclosing structures. Academia. Architecture and Construction. 2016;(2):97–105. (In Russian).

11. Kupriyanov V.N., Safin I.Sh. Design of enclosing structures taking into account the diffusion and condensation of vaporous moisture. Izvestiya KGASU = News of the Kazan State University of Architecture and Engineering. 2011;(1):93–103. (In Russian).
12. State Standard 10923-93. Ruberoid. Specifications. Moscow: Standards Publishing House; 1994. (In Russian).
13. State Standard 26633-2015. Normal-weight and sand concretes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
14. SP 50.13330.2012. Thermal performance of the buildings. Updated version of SNiP 23-02-2003. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2012. (In Russian).
15. SP 131.13330.2020. Building climatology. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
16. SP 23-101-2004. Thermal performance desing of buildings. Moscow; 2004. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Валентина Матвеевна Туснина[✉], канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды НИУ МГСУ, Москва

e-mail: valmalaz@mail.ru

тел.: +7 (916) 510-72-24

Valentina M. Tusnina[✉], Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Architectural and Construction Design and Environmental Physics, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: valmalaz@mail.ru

tel.: +7 (916) 510-72-24

Алексей Андреевич Емельянов, канд. техн. наук, директор проектно-изыскательской компании ООО «Научно-технический центр Инжиниринга», Москва

e-mail: stcofengineering@mail.ru

тел.: +7 (903) 294-13-78

Alexey A. Emelyanov, Cand. Sci. (Engineering), Director of the Design and Survey Company LLC “Scientific and technical center of engineering”, Moscow

e-mail: stcofengineering@mail.ru

tel.: +7 (903) 294-13-78

Денис Андреевич Емельянов, канд. техн. наук, главный инженер проектно-изыскательской компании ООО «Научно-технический центр Инжиниринга», Москва

e-mail: stcofengineering@mail.ru

тел.: +7 (977) 343-27-48

Denis A. Emelyanov, Cand. Sci. (Engineering), Chief Engineer of the Design and Survey Company LLC “Scientific and technical center of engineering”, Moscow

e-mail: stcofengineering@mail.ru

tel.: +7 (977) 343-27-48

[✉]Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.138

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-70-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-70-79)

EDN: IJDSVY

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ НАГРУЗОК ПРИ УСИЛЕНИИ ОПОЛЗНЕВЫХ СКЛОНОВ НАГЕЛЯМИ НА ОСНОВЕ ТРУБЧАТЫХ ВИНТОВЫХ ШТАНГ НА ИХ НЕСУЩУЮ СПОСОБНОСТЬ И ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

А.И. ХАРИЧКИН^{1,2}, канд. техн. наук

Д.Д. БАБИЧ^{1,2,✉}

И.М. ГАЛИМОВ^{1,2}, канд. техн. наук

Д.В. ЧЕРНЯТИН^{1,2}

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

² Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Взаимодействие нагелей с грунтовым основанием представляет большой интерес для специалистов-геотехников. Метод повышения устойчивости оползневых склонов грунтовыми нагелями зарекомендовал себя как достаточно универсальный и экономически эффективный. Однако процесс разработки проектных решений с применением нагелей выполняется с использованием эмпирических и полумпирических методов, которые не учитывают влияние отдельных параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями на основе трубчатых винтовых штанг на их несущую способность и прочностные характеристики.

Целью работы является вычисление наиболее эффективного угла заложения нагелей в откосе, а также определение характеристик перемещения грунта оползневого склона по потенциальной поверхности скольжения и их влияния на несущую способность нагеля и его прочностные характеристики.

Материалы и методы. Выполнен обзор одиннадцати научных источников по исследованиям влияния параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями на основе трубчатых винтовых штанг на их несущую способность и прочностные характеристики. Для анализа отбирались источники, наиболее близкие к теме исследования. При проведении расчета использовался программный комплекс PLAXIS 2D.

Результаты. По результатам расчета и анализа литературы были сделаны выводы об оптимальном угле заложения нагелей в откосе, который соответствует значению в диапазоне от 0° до 5° к горизонту. Также исследование показало, что развитие сдвиговых напряжений вдоль нагеля происходит неравномерно во времени, а допущение о постоянном значении сдвиговых напряжений по всей длине нагеля или корня анкера может привести к завышению значения несущей способности по грунту.

Выводы. Полученные результаты показали, что изучение влияния параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями является актуальной темой и подтверждает необходимость ее дальнейшего детального исследования.

Ключевые слова: нагель, грунтовый массив, склон, откос, устойчивость, несущая способность, грунтовый анкер, противооползневая защита, свая, микросвая, трубчатая винтовая штанга, ТВШ, нагельное поле, численное моделирование

Для цитирования: Харичкин А.И., Бабич Д.Д., Галимов И.М., Чернятин Д.В. Влияние параметров нагрузок при усилении оползневых склонов нагелями на основе трубчатых винтовых штанг на их несущую способность и прочностные характеристики. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):70–79. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-70-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-70-79)

Вклад авторов

Харичкин А.И., Галимов И.М. – идея, концепция исследования, научное руководство, написание статьи. Бабич Д.Д., Чернятин Д.В. – сбор и анализ материалов, выполнение расчетов, формирование выводов, написание статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 09.02.2024

Поступила после рецензирования 27.02.2024

Принята к публикации 05.03.2024

INFLUENCE OF LOAD PARAMETERS DURING LANDSLIDE SLOPE REINFORCEMENT WITH SOIL NAILS BASED ON SELF-DRILLING HOLLOW STEEL BARS ON THEIR BEARING CAPACITY AND STRENGTH PROPERTIES

A.I. KHARICHKIN^{1,2}, Cand. Sci. (Engineering)

D.D. BABICH^{1,2,✉}

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

D.V. CHERNYATIN^{1,2}

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

² *Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation*

Abstract

Introduction. Soil nails are widely used to reinforce landslide slopes and ground-retaining structures in many countries, including Russia. The interaction of soil nails with the soil base is of high interest to both engineers and researchers. The method of increasing the stability of landslide slopes with soil nails has proved to be versatile and cost-effective. However, the process of designing soil nails is usually carried out using empirical and semi-empirical methods that may ignore a number of important factors.

Aim. To determine the most optimal angle of soil nail inclination, as well as to analyze the characteristics of soil movement of a landslide slope along a potential sliding surface and their influence on the bearing capacity of the soil nail and its strength characteristics.

Materials and methods. A review of scientific publications on the influence of load parameters during landslide slope reinforcement with soil nails based on self-drilling hollow steel bar on their bearing capacity and

strength properties was carried out. The review sample included 11 publications most relevant to the topic under study. Calculations were carried out using the PLAXIS 2D software environment.

Results. The conducted calculations and literature review allowed the optimal angle of soil nail inclination in the slope to be established, which corresponds to a value ranging from 0° to 5° to the horizon. The study also showed that the development of shear stresses along the soil nail in time exhibits a non-uniform nature. Therefore, the assumption of a constant value of shear stresses along the entire length of the nail or anchor root can lead to an overestimation of the soil bearing capacity.

Conclusions. The obtained results have confirmed the relevance of further research into the influence of load parameters during the reinforcement of landslide slopes using soil nails.

Keywords: soil nail, soil mass, slope, stability, bearing capacity, ground anchor, reinforcement, pile, micropile, hollow steel bar, self-drilling rod, soil nails field, numerical modeling

For citation: Kharichkin A.I., Babich D.D., Galimov I.M., Chernyatin D.V. Influence of load parameters during landslide slope reinforcement with soil nails based on self-drilling hollow steel bars on their bearing capacity and strength properties. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):70–79. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-70-79](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-70-79)

Author contribution statements

Kharichkin A.I., Galimov I.M. – idea, research concept, scientific supervision, article writing.
Babich D.D., Chernyatin D.V. – collecting and analyzing materials, performing calculations, forming conclusions, article writing.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 09.02.2024

Revised 27.02.2024

Accepted 05.03.2024

Введение

Проблема оползневой опасности широко распространена во всем мире. Высокая стоимость возведения подпорных стен для удержания оползневых склонов привела к необходимости разработки других методов. Одним из них является метод армирования грунтового массива склонов с помощью нагельных полей.

Устройство грунтовых нагелей – это метод стабилизации грунта, который используется для усиления неустойчивых склонов природного или техногенного сложения. Этот подход также используется для безопасного увеличения крутизны грунтового массива склонов. При этом методе стабилизации склонов в грунтовой откос устанавливается относительно тонкий армирующий элемент. Нагели обычно представляют собой стальные стержни или трубы, армирующие элементы из композитных материалов или наиболее часто применяемые железобетонные элементы. Выбор материала производится в зависимости от требований и условий устройства.

Важным фактором при устройстве нагельных полей является угол заложения нагеля. Специалисты до сих пор дискутируют о влиянии угла заложения нагеля на его несущую способность и устойчивость грунтового массива [1]. Также требует оценки вопрос влияния изгиба нагеля под воздействием поперечных сил, вызванных движением оползневого тела [2].

Состояние вопроса

В статье [1] исследовалось влияние углов заложения нагелей на изменение величин выдергивающих усилий, возникающих в них при усилении оползневых склонов. Расчет склона был произведен для трех углов откоса (45° , 63° и 80°) с применением упругопластической грунтовой модели Мора – Кулона. Нагели в расчетной модели располагались в пять рядов с углами заложения 5° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° к горизонтали.

На рис. 1 представлены графики распределения выдергивающих усилий для четвертого нагеля при различных углах заложения нагелей и углах откоса.

В статье [2] предложена математическая модель для моделирования процесса передачи нагрузки на контакте нагеля и окружающего грунта.

Принято, что нагели работают преимущественно на растяжение, но в них также возникают сдвиговые усилия и изгиб на границе поверхности скольжения (рис. 2а). В условиях эксплуатации изгибом обычно пренебрегают. Однако по мере приближения к потере устойчивости склона вклад изгиба становится более значительным. Изгиб также может влиять на нормальное давление по длине нагеля и, следовательно, на сопротивление сдвигу по контакту нагеля и грунта. На рис. 2б показано, что изгиб нагеля способствует развитию нормальных и сдвиговых напряжений вокруг нагеля. Однако вклад изгиба нагеля в сопротивление сдвигу по контакту нагеля и грунта не исследовался. Предложено оценивать влияние изгиба нагеля в процессе роста деформаций грунта в откосе.

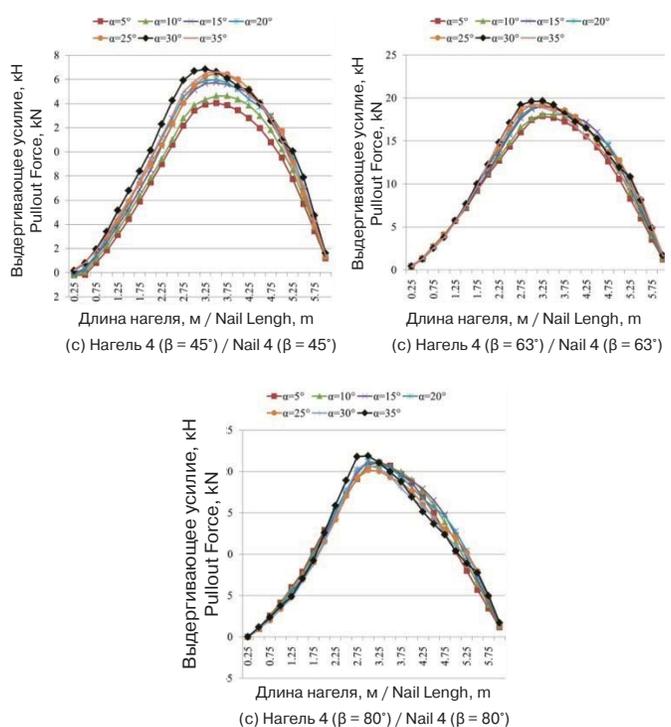


Рис. 1. Графики распределения выдергивающих усилий для четвертого нагеля при различных углах его заложения и углах откоса

Fig. 1. Plots of pullout force distribution for the fourth soil nail at its different inclination and slope angles

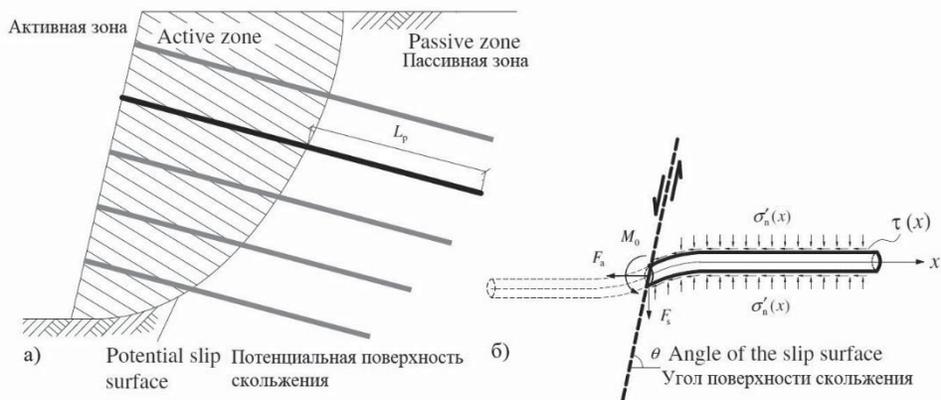


Рис. 2. Характер разрушения склона: а – склон, армированный нагелями; б – локальное разрушение нагеля в склоне

Fig. 2. Nature of slope failure: а – slope reinforced with soil nails; б – local failure of a soil nail in the slope

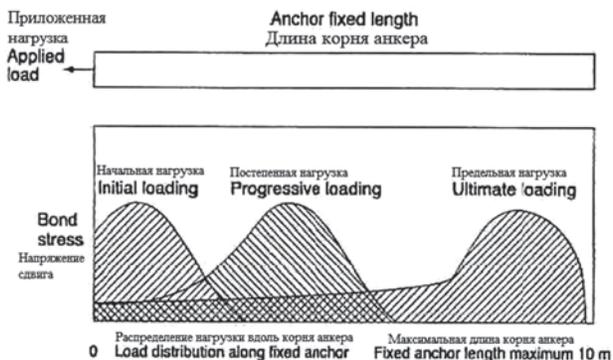


Рис. 3. Неравномерное распределение сдвиговых напряжений вдоль корня анкера

Fig. 3. Uneven distribution of shear stresses along the anchor root

В работе [3] ученые из Технического университета в Брно исследовали поведение грунтовых анкеров в мелкозернистых песках под действием нагрузок и перемещений.

Ими установлено, что развитие сдвиговых напряжений вдоль корня грунтовых анкеров происходит неравномерно во времени. На первых этапах нагружения напряжения сдвига, возникающие на контакте «грунт – анкер», концентрируются в начальной части корня анкера. После достижения пикового значения напряжение сдвига последовательно уменьшается до остаточного значения. Пиковое сдвиговое напряжение перемещается вдоль анкера, как схематично показано на рис. 3. Подобное пиковое распределение напряжения сдвига вдоль анкера было экспериментально подтверждено несколькими авторами: Остермайер [4], Шееле [5], Барли [6], Вудс и Баркхордари [7]. Описанное явление оказывает серьезное влияние на предельное сопротивление грунтовых анкеров и на графики зависимости перемещения от нагрузки. Предельная несущая способность анкера по грунту не прямо пропорциональна длине корня анкера.

Поскольку максимальное напряжение сдвига достигается только на небольшом участке корня анкера, то анкеры с длиной корня более 8 м неэффективны (Барли [8]). Допущение

о постоянном значении сдвиговых напряжений по всей длине корня анкера может привести к завышению значения несущей способности.

Расчетная оценка устойчивости склона, усиленного нагелями

В настоящее время устройство нагелей при усилении оползневых склонов является достаточно распространенным методом. При этом многие вопросы и параметры остаются за рамками проектирования. Для оценки коэффициентов устойчивости склона до и после усиления нагелями был выполнен расчет в программном комплексе PLAXIS 2D.

В качестве расчетной модели был принят склон с углом откоса, равным 40° (рис. 4). Расчеты производились с применением упругопластической грунтовой модели Мора – Кулона. Были приняты следующие расчетные физико-механические характеристики для грунта: $\gamma = 2,66 \text{ г/см}^3$; $C = 0,002 \text{ МПа}$; $\varphi = 38^\circ$; $E = 20,5 \text{ МПа}$; $\nu = 0,29$.

При проведении расчетов было принято пять рядов нагелей длиной 10 м и диаметром 120 мм со следующими вариантами угла заложения (рис. 5):

- I – угол заложения всех нагелей – 30° к горизонту;
- II – горизонтальное положение всех нагелей;
- III – каждый из пяти нагелей расположен перпендикулярно потенциальной поверхности скольжения.

Результаты расчетов представлены на рис. 6–8 и в таблице.

По представленным результатам расчетов можно сделать вывод, что величина выдергивающих усилий, возникающих в нагелях, имеет наименьшее значение при угле заложения, равном нулю, а наибольшее – при угле 30° . Проверку сопротивления нагелей по материалу необходимо выполнять на совместное действие N , M и Q .

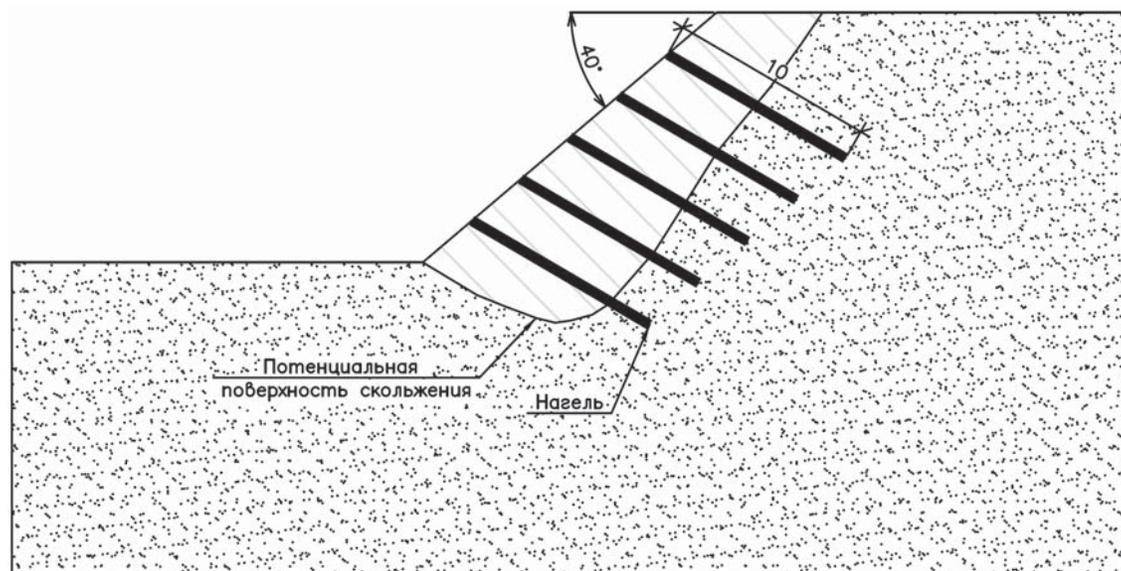


Рис. 4. Пример расчетной модели с углом заложения нагелей, равным 30°

Fig. 4. Example of a calculation model with a nail installation angle of 30°

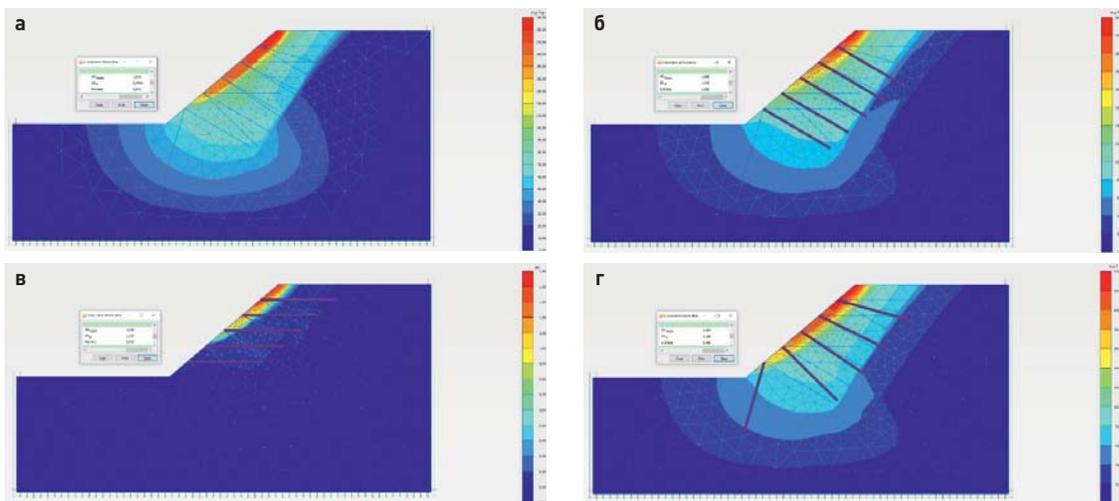


Рис. 5. Результаты расчета устойчивости для: *а* – склона в природном состоянии; *б* – склона, армированного нагелями по I варианту; *в* – склона, армированного нагелями по II варианту; *г* – склона, армированного нагелями по III варианту

Fig. 5. Results of stability calculations for: *a* – a slope in natural state; *b* – a slope reinforced with soil nails according to variant I; *v* – a slope reinforced with soil nails according to variant II; *r* – a slope reinforced with soil nails according to variant III

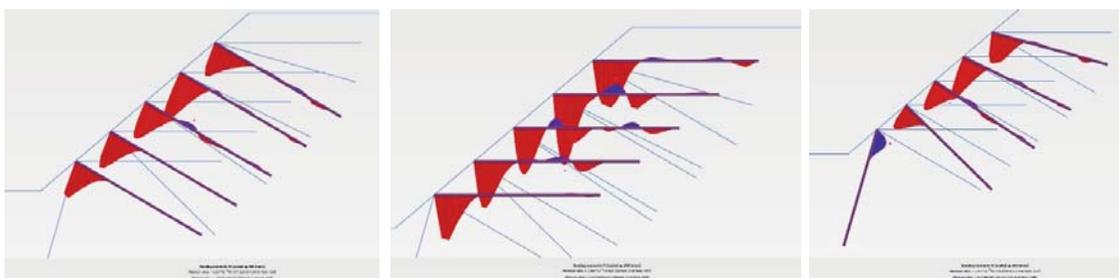


Рис. 6. Изгибающий момент в нагелях (три варианта угла заложения)
Fig. 6. Bending moment in soil nails (three variants of installation angle)

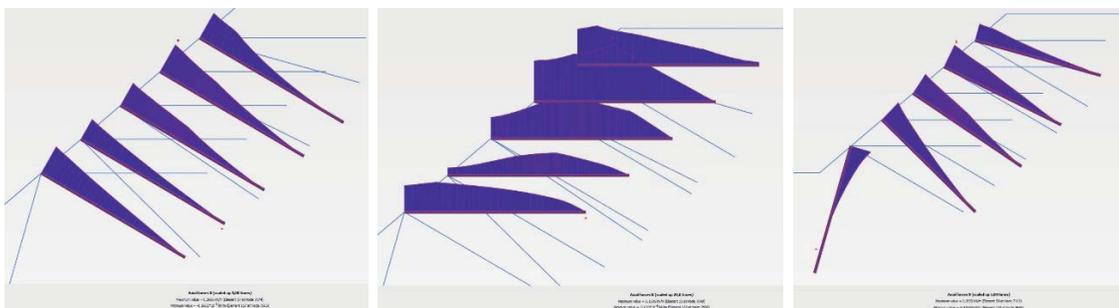


Рис. 7. Продольные усилия в нагелях (три варианта угла заложения)
Fig. 7. Longitudinal forces in soil nails (three variants of installation angle)

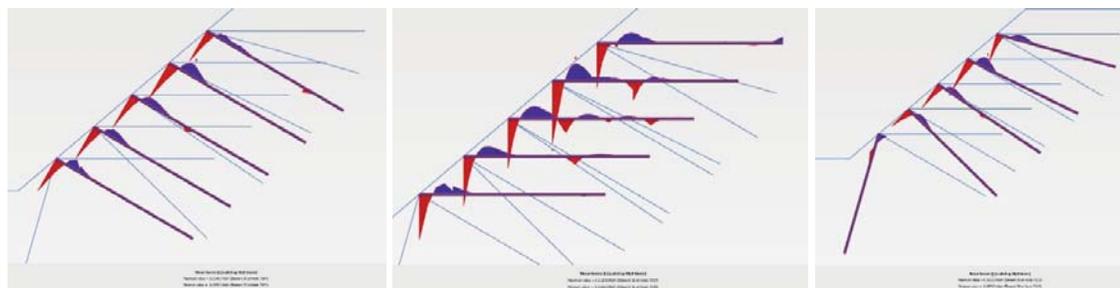


Рис. 8. Поперечные силы в нагелях (три варианта угла заложения)
Fig. 8. Transverse forces in soil nails (three variants of installation angle)

Таблица

Результаты расчетов

Table

Calculation results

Вариант угла заложения нагелей	Склон в природном состоянии	Склон, армированный нагелями			
		коэффициент устойчивости	максимальные значения усилий		
			<i>M</i> , кНм	<i>N</i> , кН/м	<i>Q</i> , кН/м
I (30°)	0,9584	1,249	-0,017	0,369	-0,054
II (0°)		1,327	-0,021	0,159	-0,067
III (пер.)		1,168	-0,018	0,366	-0,057

Заключение

На основании анализа и данных научных источников и выполненного расчета можно сделать следующие выводы.

1. По результатам расчета наиболее высокое значение коэффициента устойчивости грунтового массива, усиленного нагелями, соответствует углу их заложения в диапазоне от 0° до 5° к горизонту.

2. Развитие сдвиговых напряжений вдоль нагеля происходит неравномерно во времени.

3. Допущение о постоянном значении сдвиговых напряжений по всей длине корня анкера может привести к завышению значения несущей способности по грунту.

Список литературы / References

1. Najafi N., Kalehsar R.I., Khodaei M., Dehghan A.N., Karroubi A. Effect of installation angle on pull-out resistance of nails in soil slopes. SN Applied Sciences. 2021;3:723. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04705-2>
2. Zhou W.-H., Yin J.-H. A simple mathematical model for soil nail and soil interaction analysis. Computers and Geotechnics. 2008;35(3):479–488. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2007.07.001>
3. Chalmovský J., Mica L. The load-displacement behaviour of ground anchors in fine grained soils. Acta Polytechnica CTU Proceedings. 2018;16:18–24. <https://doi.org/10.14311/APP.2018.16.0018>
4. Ostermayer H. Construction, carrying behaviour and creep characteristics of ground anchors. In: Diaphragm Walls & Anchorages. London: ICE Publishing; 1975, pp. 141–151.

5. *Scheele F.* Tragfähigkeit von Verpressankern in nichtbindigen Boden Neue Erkenntnisse durch Dehnungsmessungen im Verankerungsbereich. Technische Universität München; 1981.
6. *Barley A.D., Littlejohn S.* The single bore multiple anchor system. In: Ground anchorages and anchored structures. Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK, on 20–21 March 1997. Thomas Telford Publishing; 1997, pp. 65–75.
7. *Woods R.I., Barkhordari K., Littlejohn S.* The influence of bond stress distribution on ground anchor design. In: Ground anchorages and anchored structures. Proceedings of the international conference organized by the Institution of Civil Engineers and held in London, UK, on 20–21 March 1997. Thomas Telford Publishing; 1997, pp. 55–64.
8. *Barley A.D.* Theory and practice of the single bore multiple anchor system. In: Anker in Theorie und Praxis. Proc. Int. Symposium. Salzburg; 1995, pp. 297–301.
9. *Gassler G.* Vernagelte gelandesprünge – tragverhalten und standsicherheit [PhD thesis]. University of Karlsruhe; 1987.
10. *Pedley M.J.* The performance of soil reinforcement in bending and shear [PhD Thesis]. University of Oxford; 1990.
11. *Sawicki A.* Mechanics of reinforced soil. Rotterdam, Brookfield, Vt: Balkema; 2000.

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Игоревич Харичкин, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; заведующий лабораторией механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: andrei.kharichkin@gmail.ru

Andrey I. Kharichkin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Head of the Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: andrei.kharichkin@gmail.ru

Данил Дмитриевич Бабич[✉], аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; младший научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: danil.babich@gmail.com

Danil D. Babich[✉], Graduate Researcher, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Junior Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: danil.babich@gmail.com

Илья Мидхатович Галимов, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсееванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: iljagalimov@mail.ru

Ilya M. Galimov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: iljagalimov@mail.ru

Дмитрий Владимирович Чернятин, аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; младший научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chernyatin94@mail.ru

тел.: +7 (926) 129-29-80

Dmitriy V. Chernyatin, Graduate Researcher, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Junior Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Process Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chernyatin94@mail.ru

tel.: +7 (926) 129-29-80

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.046:624.154.9

<https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1{40}-80-91>

EDN: LUDLBQ

ВЛИЯНИЕ КОНФИГУРАЦИИ НАГЕЛЕЙ В ГРУППЕ НА УСТОЙЧИВОСТЬ ЗАКРЕПЛЯЕМОГО ГРУНТОВОГО МАССИВА

А.И. ХАРИЧКИН^{1,2}, канд. техн. наук

Д.В. ЧЕРНЯТИН^{1,2,✉}

И.М. ГАЛИМОВ^{1,2}, канд. техн. наук

Д.Д. БАБИЧ^{1,2}

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

² Научно-исследовательский, проектно-изыскательский и конструкторско-технологический институт оснований и подземных сооружений (НИИОСП) им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство», Рязанский проспект, д. 59, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Укрепление откосов нагельными полями является наиболее экономичным и экологичным методом их стабилизации. Однако отсутствие теоретически обоснованных схем оптимального размещения нагелей в группе, подтвержденных испытаниями в различных условиях, приводит к неэффективному, зачастую избыточному применению материала при устройстве инженерной защиты.

Цель работы: определение наиболее эффективного расположения нагелей в группе с точки зрения общей устойчивости закрепляемого массива. Количественная оценка устойчивости в зависимости от шага и формы расстановки нагелей в группе.

Материалы и методы. Выполнен обзор зарубежной и отечественной литературы по проблеме оценки влияния размещения нагельных и анкерных групп при закреплении откосов. По результатам анализа состояния вопроса выполнен установочный расчет с использованием численного моделирования в программном комплексе PLAXIS 3D.

Результаты. Существующие исследования ограничены анализом влияния конфигурации групп винтовых анкеров и не учитывают использование нагелей цилиндрического сечения, что подчеркивает необходимость дальнейших комплексных исследований в этой области. По результатам установочного расчета, выполненного методом численного моделирования, проведено сравнение полученных коэффициентов устойчивости для пяти типов конфигурации нагельных групп. Результаты расчета подтверждают наличие зависимости, устойчивость откоса от конфигурации и количества нагелей в группе. Разница между коэффициентами устойчивости для многоугольной и треугольной трехрядной конфигураций составила 0,072 %, при этом многоугольная конфигурация требует на три единицы нагелей меньше. Так, выбор оптимальной расстановки нагелей может привести к увеличению эффективности противооползневых мероприятий и сокращению затрат.

Выводы. В данной статье подтверждается актуальность и важность изучения влияния конфигурации групп нагелей на устойчивость откосов, подчеркивается необходимость проведения более глубоких и комплексных исследований в этой области.

Ключевые слова: нагель, нагельное поле, конфигурация нагелей, грунтовый массив, склон, устойчивость откоса, несущая способность, грунтовый анкер, противооползневая защита, численное моделирование

Для цитирования: Харичкин А.И., Чернятин Д.В., Галимов И.М., Бабич Д.Д. Влияние конфигурации нагелей в группе на устойчивость закрепляемого грунтового массива. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):80–91. <https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1{40}-80-91>

Вклад авторов

Харичкин А.И., Галимов И.М. – идея, концепция исследования, научное руководство, написание статьи. Чернятин Д.В., Бабич Д.Д. – сбор и анализ материалов, выполнение расчетов, формирование выводов, написание статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 06.02.2024

Поступила после рецензирования 01.03.2024

Принята к публикации 05.03.2024

INFLUENCE OF DOWEL GROUP CONFIGURATION ON THE STABILITY OF REINFORCED SLOPES

A.I. KHARICHKIN^{1,2}, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. CHERNYATIN^{1,2,✉}

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

D.D. BABICH^{1,2}

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

² Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazanskiy ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. Slope reinforcement with dowels is the most economical and environmentally friendly method of their stabilization. However, the lack of theoretically substantiated schemes for optimal placement of dowels in groups, confirmed by tests in various conditions, leads to inefficient, often excessive use of the material in the arrangement of engineering protection.

Aim. To determine the most effective arrangement of dowels in groups with regard to the overall stability of the reinforced soil mass. To assess quantitatively the stability depending on the spacing and shape of dowels in the group.

Materials and methods. A review of international and Russian literature on the problem of assessing the influence of geometric parameters of dowel and anchor groups was carried out. According to the results of the review, primary calculations with the use of numerical simulation in the PLAXIS 3D software package was carried out.

Results. The available publications mainly analyze configurations of screw anchor groups, paying insufficient attention the use of dowels of cylindrical cross-section. This fact substantiates further research in this field. The conducted numerical simulation allowed the slope stability provided by five dowel group configurations to be compared. The calculation results show that the slope stability depends on the configuration and the number of dowels in the group. The difference between the stability factors for the polygonal and triangular three-row configuration was 0.072 %, with the polygonal configuration requiring three dowels less. Selection of optimal dowel placement contributes to increased landslide control efficiency and reduced costs.

Conclusions. The relevance and importance of studying the effect of dowel group configuration on slope stability, emphasizing the need for more in-depth and comprehensive research in this area.

Keywords: dowel, dowel field, dowel configuration, soil mass, slope, slope stability, bearing capacity, soil anchor, landslide protection, numerical simulation

For citation: Kharichkin A.I., Chernyatin D.V., Galimov I.M., Babich D.D. Influence of dowel group configuration on the stability of reinforced slopes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):80–91. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-80-91](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-80-91)

Author contribution statements

Kharichkin A.I., Galimov I.M. – idea, research concept, scientific supervision, article writing.
Chernyatin D.V., Babich D.D. – data collection and analysis, performing numerical calculations, forming conclusions, article writing.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 06.02.2024

Revised 01.03.2024

Accepted 05.03.2024

Введение

Наиболее распространенным способом защиты территории от развития склоновых процессов является улучшение строительных свойств грунтового массива. В этом ряду особое место занимает армирование грунтов с помощью нагелей.

Грунтовый нагель – это горизонтальный или наклонный армирующий элемент или буринъекционная микросвая, устраиваемые без предварительного натяжения в грунтовом откосе или в вертикальной стене выемки по мере ее разработки, а также в естественном склоне для повышения его устойчивости и уменьшения активного давления. Обычно нагели устанавливаются группами, образуя нагельное поле, которое взаимодействует с грунтом, формируя армированный массив.

Эффективное применение данного метода ограничено отсутствием достаточно разработанной методики расчета устойчивости армогрунтовых массивов. Трудности связаны с описанием напряженно-деформированного состояния таких массивов и малым числом исследований взаимодействия групп армирующих конструкций с грунтом.

Важным вопросом является отсутствие обоснованных схем оптимального размещения нагелей в группе, а также параметров их заложения в различных грунтовых условиях. Сохраняется проблема отсутствия единого подхода в расчетах укрепления откосов нагельными.

Состояние вопроса

Укрепление склонов при помощи нагельных полей, в отличие от многих других методов, которые требуют дорогостоящих работ по подрезке склонов или строительству массивных подпорных стен, является экономически выгодным и эффективным решением. Применение нагелей практически не оказывает воздействия на окружающую среду и природные ландшафты, что позволяет сохранить их в естественном состоянии.

Существуют два основных способа устройства нагельных конструкций в грунтовом массиве. Первый предполагает забивку, вдавливание или завинчивание готовых армирующих элементов. Второй предусматривает проходку горизонтальных или наклонных скважин для последующего формования в них нагелей с использованием инъекционных технологий.

Нагельное крепление, осуществляемое с использованием второго метода, включает следующие этапы: бурение скважины, установка стального или стеклопластикового стержня, инъектирование скважины.

На склонах, где границы потенциального тела оползня могут образовывать большие по площади участки, требующие надежного закрепления, используются нагели, объединенные в группы. Нагельное поле состоит из нескольких ярусов нагельных рядов, количество которых зависит от высоты закрепляемого откоса. При проектировании нагельных полей важными являются следующие параметры: конструкция и длина нагелей, расстояние между ярусами, шаг нагелей в ярусе, расположение нагелей в группе, угол наклона нагелей к горизонту, диаметр скважин, толщина защитного покрытия, угол откоса.

В работе [1] и СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013 [2] изложен практический опыт по применению нагельных креплений откоса.

При расчете и выборе параметров нагельного крепления откоса согласно СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013 [2] следует учесть несколько ограничений. Во-первых, длина нагелей должна зависеть от высоты откоса или глубины котлована и составлять от 40 до 80 % от высоты. Расстояние между ярусами, шаг нагелей и параметры сетки их размещения должны быть от 0,5 м для погружных нагелей и до 1,5 м для буроинъекционных нагелей. Угол наклона нагелей к горизонту должен быть в пределах от 0° до 30°, а диаметр скважин для буроинъекционных нагелей – от 60 до 170 мм. Угол откоса от вертикали должен находиться в интервале от 0° до 30°, а толщина защитного покрытия должна быть от 50 до 150 мм. Важно отметить, что все эти ограничения введены исходя из практического опыта, но не имеют теоретического обоснования.

В исследовании [3] приводятся результаты эксперимента в лотке по измерению степени осадки грунтового массива на неармированном и армированном грунтовыми нагелями откосе. Для этого был изготовлен прямоугольный лоток размером 0,60 × 0,40 × 0,30 м из фанеры. В качестве модели грунтовых нагелей для укрепления откоса были использованы полые алюминиевые трубки диаметром 10 мм и длиной 16 см. Деформации, возникающие в грунте и армирующих элементах, оценивались с помощью тензометрических датчиков струнного типа. Для создания нагрузки на верхнюю часть откоса использовалась опорная стальная плита размером 0,16 × 0,08 × 0,035 м. Регистрация осадки грунтового массива откоса выполнялась с помощью индикатора часового типа. Грунт в эксперименте представлен неоднородным песком с $\varphi = 31^\circ$.

Сначала был испытан грунтовый откос без армирования и определена его осадка от приложенной нагрузки. Затем был испытан грунтовый откос с установленными под разными углами (0°, 15° и 30°) нагелями. Без армирования конечная осадка откоса составила 6,75 мм при максимальной нагрузке в 1020 Н. После того как было выполнено армирование, конечная осадка грунтового откоса уменьшилась, приняв большую нагрузку по сравнению с неармированным грунтовым откосом. Как показано на графике (рис. 1), по мере увеличения наклона нагелей оседание также увеличивается, а несущая способность склона снижается. При наклоне нагелей 0°, 15° и 30° конечная осадка грунтового склона составила 5,19; 5,75 и 6,08 мм при нагрузке разрушения 1560, 1500 и 1460 Н соответственно.

Таблица максимальных нагрузок и осадок при разных значениях углов заложения нагелей

Угол заложения нагелей	Максимальная нагрузка, N	Максимальные осадки, мм
Неармированный	1020	6,75
0°	1560	5,19
15°	1500	5,75
30°	1460	6,08

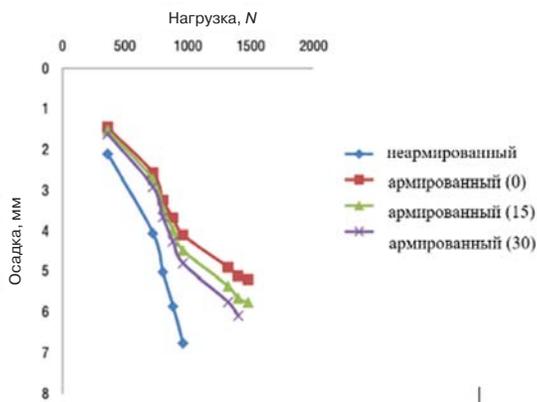


Рис. 1. График зависимости осадки от нагрузки для разных углов заложения нагелей

Fig. 1. Load-dependent settlement graph for different embedment angles of dowels



Рис. 2. Конфигурация нагелей при эксперименте

Fig. 2. Dowel configuration in the experiment

водился в лотке с размерами 100 × 30 × 60 см, передняя и задняя стенки которого были изготовлены из прозрачного оргстекла. Схема лотка и его фото перед началом испытаний показаны на рис. 4.

Для испытания использовался сухой неоднородный песок.

В эксперименте использованы следующие типы анкеров:

- однолопастные винтовые анкеры (маленькие квадратные и круглые плитные анкеры);
- двухлопастные винтовые анкеры (средние квадратные и круглые плитные анкеры);
- трехконтурные винтовые анкеры (большие квадратные и круглые плитные анкеры).

В табл. 1 и на рис. 5 представлены основные параметры сравниваемых анкеров. Длина стержня анкера составляет 300 мм для плитных и 375 мм для винтовых анкеров.

Расстояние по горизонтали принято между анкерами 150 мм. На подпорной стенке анкеры располагались в различных конфигурациях: квадратная, ромбовидная и конвертная (рис. 4).

В испытаниях было изучено влияние на осадку грунтового массива откоса различных по форме групп нагелей. Сравнивались следующие формы: квадратная, ступенчатая и ромбовидная, – как показано на рис. 2.

В случае ступенчатого расположения нагелей осадка была меньше, чем в случае квадратной и ромбовидной конфигурации. На рис. 3 показано, что максимальная осадка составила 5,19; 6,05 и 4,75 мм при нагрузке 1560, 1420 и 1600 Н для квадратной, ромбовидной и ступенчатой формы соответственно.

В результатах исследований отсутствует схема деформации откоса с нагелями и без нагелей, что не позволяет оценить влияние конфигурации на устойчивость массива.

Большинство научных исследований в области изучения воздействия конфигураций армирующих элементов рассматривают данный вопрос, используя винтовые анкеры. Полученный опыт и результаты таких исследований могут быть применены для решения проблемы с закреплением откоса при помощи нагелей.

Одной из таких работ, которую хотелось бы осветить, является статья [4]. В ней приводятся результаты испытания масштабной модели крепления выемки стеной с различными типами винтовых анкеров. Масштаб модели был принят 1:10. Эксперимент про-

Таблица максимальных нагрузок и осадок при разной форме групп нагелей

Форма групп нагелей	Максимальные нагрузки, N	Максимальные осадки, мм
Неармированный	1020	6,75
Квадратная	1560	5,19
Ромбовидная	1420	6,05
Ступенчатая	1600	4,75

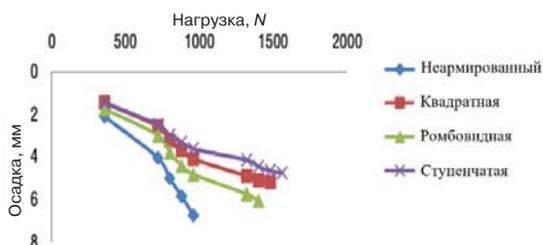


Рис. 3. График зависимости перемещений от нагрузки для разных форм групп нагелей

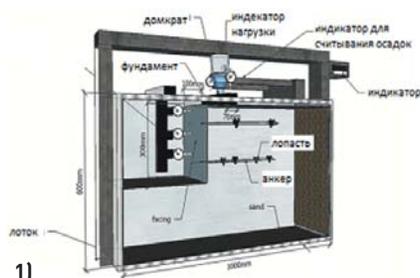
Fig. 3. Load-dependent displacement graph for different configurations of dowel groups

В 10 см от стены был установлен ленточный фундамент, и через домкрат на него подавалась вертикальная нагрузка. С помощью индикаторов часового типа следили за перемещениями и осадками. Во всех испытаниях использовался метод постоянной деформации для достижения максимальной точности при постоянной скорости нагружения. Регистрация данных производилась после каждого смещения по вертикали фундамента на 3 мм до того момента, пока общая величина осадки не достигла 18 мм.

В испытаниях измерялись значения нагрузки на ленточный фундамент, горизонтальное смещение стены и формы клина разрушения. Результаты сравнивались и оценивались в зависимости от типа анкера (винтовой или плитный), количества лопастей в спиральных анкерах, формы и размеров пластин в плитных анкерах, а также изменения расположения анкеров в грунтах.

Особое внимание обратим на оценку влияния расположения анкеров в грунтах на полученные результаты. На рис. 6 представлены гистограммы, отражающие зависимость максимальной воспринятой нагрузки и максимальных деформаций подпорной стены от конфигурации анкеров в грунтах.

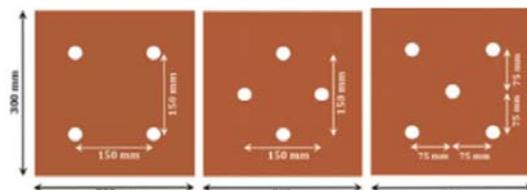
Значения максимальной воспринимаемой нагрузки фундамента изменяются в зависимости от расположения анкеров в грунтах. Конвертная группа расположения имеет большую несущую способность для всех типов анкеров в связи с добавлением пятого анкера. Несущая способность квадратной конфигурации оказалась более эффективной, чем ромбовидной конфигурации.



1)



2)



3) а) квадратная б) ромбовидная в) конвертная

Рис. 4. 1 – испытательный ящик; 2 – фото в лабораторных условиях; 3 – схема форм анкерных групп: а – квадратная; б – ромбовидная; в – конвертная
Fig. 4. 1 – test box; 2 – photo in laboratory conditions; 3 – scheme of anchor group shapes: а – square; б – diamond-shaped; в – envelope-shaped

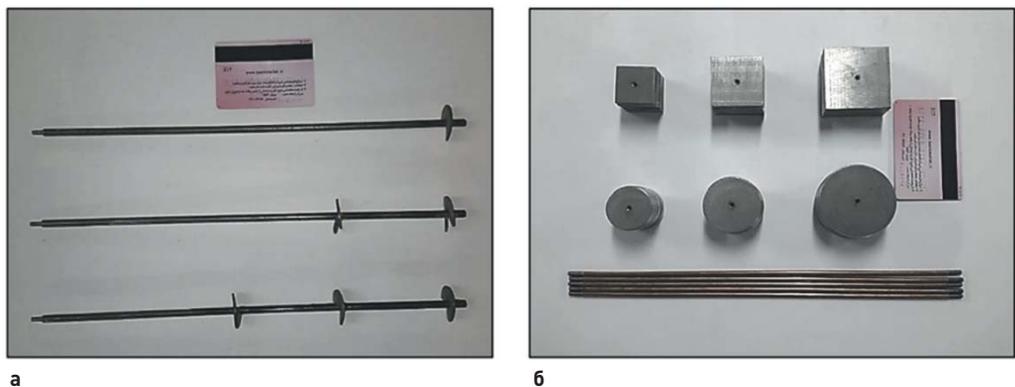


Рис. 5. Анкеры, используемые в эксперименте: а – три типа винтовых анкеров; б – шесть типов плитных анкеров
Fig. 5. Anchors used in the experiment: а – three types of screw anchors; б – six types of plate anchors

Таблица 1

Описание анкеров

Table 1

Anchor description

Обозначение	Тип анкера	Диаметр / ширина плиты, мм	Площадь плиты, мм ²	Длина анкера, мм	Длина заделки, обеспечивающей несущую способность, мм	Параметр влияния несущей способности, мм ³	Диаметр стержня, мм	Расстояние между лопастями, мм	Группа
1Н	Однолопастной винтовой	30	706,5	375	375	265	4	90	1
2Н	Двухлопастной винтовой	30	706,5	375	285–375	466	4	90	2
3Н	Трехлопастной винтовой	30	706,5	375	195–285–375	604	4	90	3
Ss	Плитный маленький квадратный	30	900	300	300	270	4	-	1
Sm	Плитный средний квадратный	40	1600	300	300	480	4	-	2
Sb	Плитный большой квадратный	50	2500	300	300	750	4	-	3
Cs	Плитный маленький круглый	33,8	900	300	300	270	4	-	1
Cm	Плитный средний круглый	45	1600	300	300	480	4	-	2
Cb	Плитный большой круглый	56,4	2500	300	300	480	4	-	3

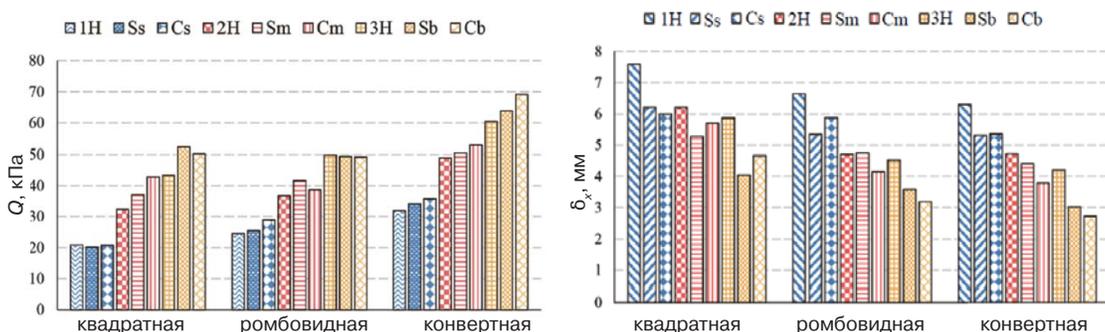


Рис. 6. Гистограммы зависимости максимальной воспринятой нагрузки и максимальных деформаций подпорной стены от расположения анкеров в грунтах [4]

Fig. 6. Dependencies of the maximum absorbed load and maximum deformations of the retaining wall on the location of anchors in soils [4]

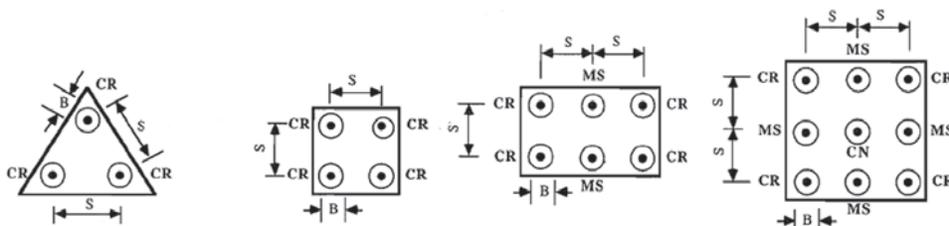


Рис. 7. Конфигурация испытанных групп анкеров [5]
Fig. 7. Configuration of tested anchor groups [5]

Изменение расположения анкеров в грунтах оказало значительное влияние на смещение стены, даже большее, чем увеличение количества анкеров. Ромбовидное расположение всех типов анкеров в грунтах показало лучшую эффективность в предотвращении смещения стены по сравнению с расположением по квадрату.

В работе [5] представлены результаты испытания на выдергивание групп винтовых анкеров в разной конфигурации (рис. 7) в песках разной плотности.

Результатами исследований установлено, что при заданном смещении вверх группа с малым количеством анкеров имеет более высокую устойчивость к подъему, чем группа с большим количеством анкеров. Описанное выше поведение было типичным для всех испытанных расстояний между анкерами и их диаметров ($S/B = 3, 4$ и 5) и для всех испытанных состояний плотности песка (плотного, средней плотности и рыхлого).

Поведение группы винтовых анкеров при подъеме зависит от следующих факторов: диаметр анкеров, глубина установки, расстояние между анкерами, свойства песка, методы их установки и конфигурация группы. Порядок установки анкеров оказывает незначительное влияние на общую выдергивающую нагрузку группы при разрушении, однако влияет на смещение отдельных анкеров при малых величинах нагрузки.

Распределение нагрузки между отдельными анкерами в группе зависит от их расположения и приложенной нагрузки.

Сопротивление группы винтовых анкеров в песчаных массивах изменяется в зависимости от характеристик плотности песка. Например, для средних и рыхлых песков сопротивление группы возрастает при увеличении расстояния между анкерами, но уменьшается

при увеличении размера группы. Влияние расстояния между анкерами в плотных песках на небольшой глубине оказывается минимальным. Однако при глубоком их расположении сопротивление возрастает, но затем уменьшается с ростом расстояния между анкерами.

Существующие исследования по теме влияния конфигурации групп анкеров в основном основаны на изучении поведения винтовых анкеров. Эти исследования, несомненно, имеют большое значение, однако они не затрагивают вопрос использования нагелей. А имеющиеся исследования с использованием нагелей ограничиваются лишь модельными испытаниями и не рассматривают вопрос влияния расположения нагелей в группе на устойчивость откосов.

Необходимость более глубокого исследования влияния расположения нагелей в группе на устойчивость откоса остается актуальной. Это обстоятельство подчеркивает важность проведения в дальнейшем комплексных исследований по этой теме.

Установочный расчет в PLAXIS 3D

Расчетная оценка влияния конфигурации нагелей на устойчивость откосов выполнена в программном комплексе PLAXIS 3D.

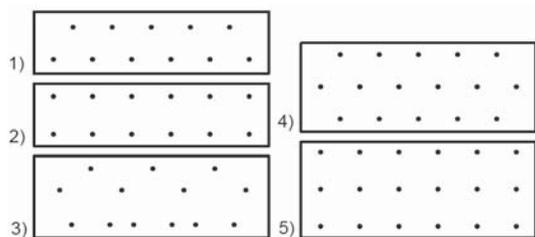
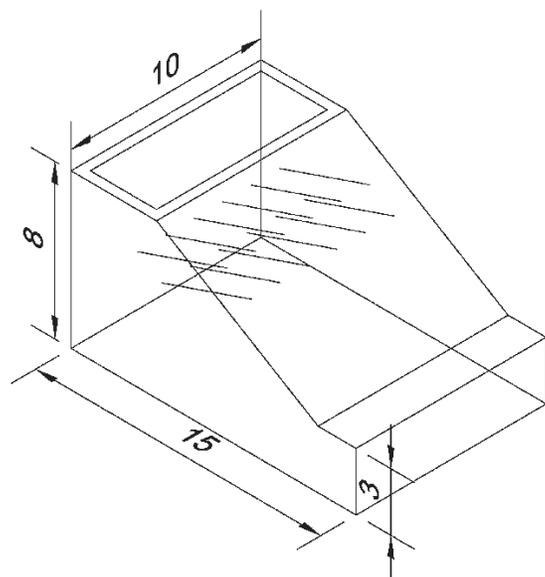


Рис. 8. Расчетная модель и различные варианты конфигураций нагелей

Fig. 8. Calculation model and different dowel configurations

Для расчета была построена 3D-модель откоса. Параметры модели представлены на рис. 8.

При расчете сравнивались следующие типы конфигураций нагелей в группе:

- треугольная с 2 и 3 рядами нагелей, расстояние между нагелями 1,5 м;
- квадратная с 2 и 3 рядами нагелей, расстояние между нагелями 1,5 м;
- многоугольная.

В качестве материала грунта был выбран песок со следующими характеристиками $\gamma = 1,7 \text{ г/см}^3$; $C = 0,001 \text{ МПа}$; $\phi = 29^\circ$.

Расчет включал в себя три этапа:

- расчет устойчивости откоса в природном состоянии;
- расчет устойчивости откоса с нагрузкой на верхней бровке 20 кН/м^2 ;
- расчет устойчивости откоса с нагрузкой на верхней бровке 20 кН/м^2 с армированием нагелями.

На рис. 9 представлены результаты расчетов в виде моделей с изолиниями. Полученные в результате расчета коэффициенты устойчивости отражены в табл. 2.

Результаты расчета свидетельствуют, что устойчивость откоса зависит от конфигурации и количества нагелей в группе. Увеличение количества нагелей сопровождается

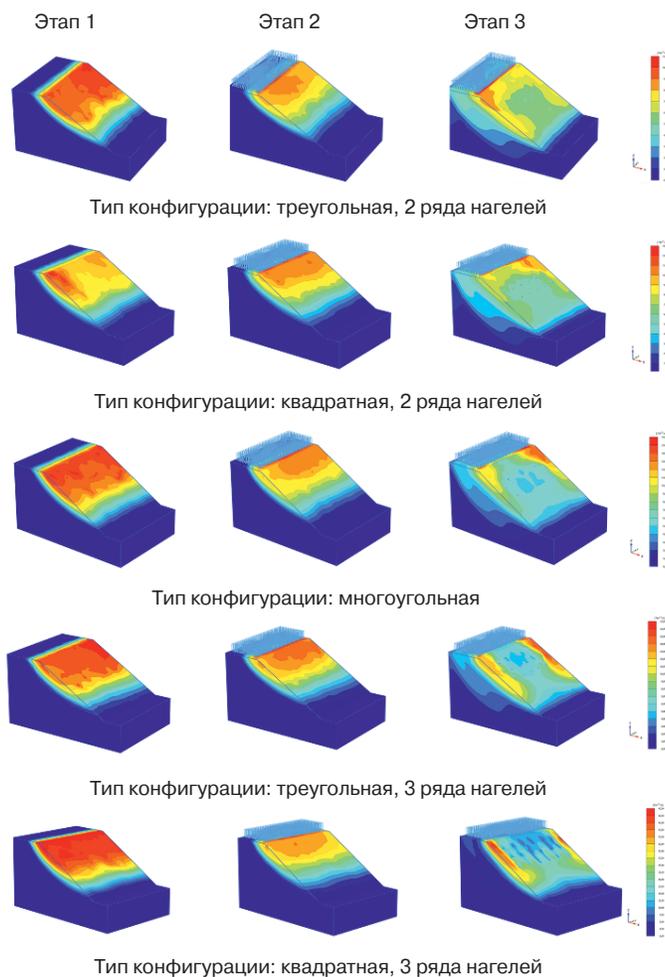


Рис. 9. Результаты расчетов откосов с различной конфигурацией нагелей
Fig. 9. Calculation results for slopes with different dowel configurations

Таблица 2

Результаты расчета

Table 2

Calculation results

Тип конфигурации	Кол-во нагелей	Коэффициент устойчивости откоса, K_{sf}		
		Природное сложение	Под нагрузкой 20 кН/м ²	Под нагрузкой 20 кН/м ² с нагелями
Треугольная, 2 ряда нагелей	11	1,291	1,227	1,364
Квадратная, 2 ряда нагелей	12	1,296	1,231	1,378
Многоугольная	13	1,297	1,232	1,387
Треугольная, 3 ряда нагелей	16	1,286	1,255	1,388
Квадратная, 3 ряда нагелей	17	1,285	1,223	1,449

повышением коэффициента устойчивости. Разница между коэффициентами устойчивости для многоугольной и треугольной трехрядной конфигурацией составила всего 0,072 %. Многоугольная конфигурация при этом требует на три единицы нагелей меньше. Это позволяет предположить, что выбор многоугольной конфигурации будет экономичнее.

Заключение

В данной статье подтверждается актуальность и важность изучения влияния конфигурации групп нагелей на устойчивость откосов, подчеркивается необходимость проведения более глубоких и комплексных исследований в этой области.

Список литературы

1. United States Federal Highway Administration. Recommendations clouterre 1991. Soil nailing recommendations –1991 for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. Report No. FHWA-SA-93-026. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees; 1993.
2. СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013. Освоение подземного пространства. Устройство грунтовых анкеров, нагелей и микросвай. Правила и контроль выполнения, требования к результатам работ. Москва; 2016.
3. Singh S., Shrivastava A.K. Effect of soil nailing on stability of slopes. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2017;5(X):752–763. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.10109>
4. Mahmoudi-Mehrzi M.E., Jalali-Moghadam M. Comparing the performance of helical anchors and direct-embedded plate anchors in cohesionless soil for top-down retaining walls stabilization: an experimental study. Journal of GeoEngineering. 2020;15(1):31–45. [https://doi.org/10.6310/jog.202003_15\(1\).3](https://doi.org/10.6310/jog.202003_15(1).3)
5. Ghaly A., Hanna A. Model investigation of the performance of single anchors and groups of anchors. Canadian Geotechnical Journal. 1994;31(2):273–284. <https://doi.org/10.1139/t94-032>
6. Маций С.И., Рябухин А.К. Свайно-анкерные противополозные конструкции. Краснодар: КубГАУ; 2017.
7. Guide to Reinforced Fill Structure and Slope Design [internet]. Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Region; 2002. Available at: https://www.cedd.gov.hk/filemanager/eng/content_115/eg6_2022.10.27.pdf

References

1. United States Federal Highway Administration. Recommendations clouterre 1991. Soil nailing recommendations –1991 for designing, calculating, constructing and inspecting earth support systems using soil nailing. Report No. FHWA-SA-93-026. U.S. Dept. of Transportation, Federal Highway Administration, Presses de L'Ecole Nationale des Ponts et Chaussees; 1993.
2. СТО НОСТРОЙ 2.5.126-2013. Underground space developing. Structure of ground anchorage, dowel pins and micropiles. Regulations, control of performance and requirements to the work results. Moscow; 2016. (In Russian).
3. Singh S., Shrivastava A.K. Effect of soil nailing on stability of slopes. International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2017;5(X):752–763. <https://doi.org/10.22214/ijraset.2017.10109>
4. Mahmoudi-Mehrzi M.E., Jalali-Moghadam M. Comparing the performance of helical anchors and direct-embedded plate anchors in cohesionless soil for top-down retaining walls stabilization: an experimental study. Journal of GeoEngineering. 2020;15(1):31–45. [https://doi.org/10.6310/jog.202003_15\(1\).3](https://doi.org/10.6310/jog.202003_15(1).3)
5. Ghaly A., Hanna A. Model investigation of the performance of single anchors and groups of anchors. Canadian Geotechnical Journal. 1994;31(2):273–284. <https://doi.org/10.1139/t94-032>

6. *Matsii S.I., Ryabukhin A.K.* Pile-anchor anti-landslide structures. Krasnodar: KubGAU; 2017. [In Russian].
7. Guide to Reinforced Fill Structure and Slope Design [internet]. Geotechnical Engineering Office Civil Engineering and Development Department The Government of the Hong Kong Special Administrative Region; 2002. Available at: https://www.cedd.gov.hk/filemanager/eng/content_115/eg6_2022.10.27.pdf

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Игоревич Харичкин, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; заведующий лабораторией механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: andrei.kharichkin@gmail.ru

Andrey I. Kharichkin, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Head of the Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Processes Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: andrei.kharichkin@gmail.ru

Дмитрий Владимирович Чернятин[✉], аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; младший научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chernyatin94@mail.ru

тел.: +7 (926) 129-29-80

Dmitriy V. Chernyatin[✉], Graduate Researcher, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Junior Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Processes Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: chernyatin94@mail.ru

tel.: +7 (926) 129-29-80

Илья Мидхатович Галимов, канд. техн. наук, доцент кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

Ilya M. Galimov, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Processes Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

Данил Дмитриевич Бабич, аспирант кафедры гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ; младший научный сотрудник лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: danil.babich@gmail.com

Danil D. Babich, Graduate Researcher, Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering, Moscow State University of Civil Engineering; Junior Researcher, Laboratory of Hazardous Natural and Technogenic Processes Mechanics and Development of Engineering Protection Methods, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: danil.babich@gmail.com

[✉]Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.32

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104)

EDN: NIYJLR

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ: РЕАЛЬНОСТЬ И ПЕРСПЕКТИВЫ

С.С. КАПРИЕЛОВ, д-р техн. наук
А.В. ШЕЙНФЕЛЬД[✉], д-р техн. наук
И.А. ЧИЛИН
В.Г. ДОНДУКОВ
Н.М. СЕЛЮТИН

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

Цель: показать анализ тенденций мирового развития за последние 30 лет и определить современные задачи технологии бетонов.

Реальность. Приведены новые понятия и термины, которые характеризуют уровень современной науки и технологии бетона в мире. Показано, что выпускаемые в промышленном масштабе уникальные по составу, форме и технологичности комплексные органоминеральные модификаторы позволили за короткий срок организовать в России массовое производство бетонов с высокими эксплуатационными свойствами объемом около 5 млн м³. Представлены примеры возведения конструкций уникальных сооружений из новых модифицированных бетонов: высотных зданий, спортивных сооружений, мостов, путепроводов, тоннелей и др.

Перспективы. Сформулированы задачи развития технологии бетонов в РФ: разработка и улучшение физико-технических характеристик бетонов; широкое использование крупнотоннажных техногенных отходов в производстве бетонных смесей; актуализация и разработка новых нормативных документов по расчету, проектированию и возведению современных конструкций и сооружений, обладающих высокой эксплуатационной надежностью, долговечностью и эстетическими свойствами.

Вывод. Показано, что уровень развития технологии бетона в России соответствует мировым достижениям.

Ключевые слова: модифицированные бетоны, бетоны с высокими эксплуатационными свойствами, высокопрочные бетоны, самоуплотняющиеся бетоны, порошковые бетоны, сталефибробетоны, особо-тяжелые бетоны, бетоны высокой коррозионной стойкости, бетоны с компенсированной усадкой

Для цитирования: Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А., Дондуков В.Г., Селютин Н.М. Модифицированные бетоны: реальность и перспективы. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):92–104. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104)

Вклад авторов

Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. – являются одними из разработчиков органоминеральных модификаторов, новых модифицированных бетонов и технологии их применения в РФ.

Чилин И.А., Дондуков В.Г., Селютин Н.М. – являются одними из разработчиков новых модифицированных бетонов и технологии их применения в РФ.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.11.2023

Поступила после рецензирования 22.12.2023

Принята к публикации 11.01.2024

MODIFIED CONCRETE: REALITY AND PROSPECTS

S.S. KAPRIELOV[✉], Dr. Sci. (Engineering)

A.V. SHEYNFELD, Dr. Sci. (Engineering)

I.A. CHILIN

V.G. DONDUKOV

N.M. SELYUTIN

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

Abstract

Aim. To review the history of concrete technology over the past 30 years and to analyze current trends in the field.

Reality. New concepts and terms that manifest the level of modern science in the field of concrete technology are given. It is shown that the use of complex organomineral modifiers produced on an industrial scale, which are characterized by unique compositions, forms, and processability, allowed Russia to organize promptly mass production of concrete with high performance properties in the amount of about 5 million m³. Examples of construction of unique structures from new modified concretes are presented. The list of such structures includes high-rise buildings, sports facilities, bridges, overpasses, tunnels, etc.

Prospects. Priority tasks for further development of concrete technology in Russia have been formulated. Among them are the development and improvement of physical and technical characteristics of concretes; extended use of large-tonnage technogenic wastes in production of concrete mixtures; updating and development of new normative documents for calculation, design, and erection of modern structures with high operational reliability, durability, and aesthetic properties.

Conclusions. The current level of concrete technology in Russia meets international standards.

Keywords: modified concrete, high-performance concrete, high-strength concrete, self-compacting concrete, reactive powder concrete, fiber-reinforced concrete, heavy-weight concrete, high-corrosion resistance concrete, shrinkage compensated concrete.

For citation: Kapriyelov S.S., Sheynfeld A.V., Chilin I.A., Dondukov V.G., Selyutin N.M. Modified concrete: reality and prospects. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):92–104. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-92-104](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-92-104)

Author contribution statements

Kapriyelov S.S., Sheynfeld A.V. – a developer of organomineral modifiers, new modified concretes, and technologies for their use in the Russian Federation.

Chilin I.A., Dondukov V.G., Selyutin N.M. – a developer of new modified concretes, and technologies for their use in the Russian Federation.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 26.11.2023

Revised 22.12.2023

Accepted 11.01.2024

Реальность

Развитие строительной отрасли и обеспечение безопасности зданий и сооружений – одно из основных условий устойчивого развития государства. В свою очередь наиболее важным критерием безопасности является высокая эксплуатационная надежность и долговечность несущих конструкций, из которых от 70 до 80 % ежегодно возводятся из бетона и железобетона.

Как известно, бетон является основным конструкционным строительным материалом благодаря наличию ряда достоинств:

- доступной технологии производства;
- использованию местных материалов и техногенных отходов;
- широкому диапазону физико-механических свойств;
- незначительным трудозатратам при производстве конструкций;
- возможности реализации различных архитектурных решений.

К этим достоинствам можно добавить, что это, пожалуй, единственный искусственный материал, свойства которого со временем улучшаются при условии их проектирования с учетом воздействия окружающей среды.

Мировые тенденции

В XXI веке строительное материаловедение в области бетона претерпело значительные изменения за счет развития знаний о механизме формирования структуры цементного камня и возможности модифицировать цементную систему с помощью эффективных добавок [1–4]. Разработаны и производятся новые модифицированные бетоны, отличающиеся по своим свойствам от традиционных. Введены новые понятия и термины. Разработаны новые и актуализированы ранее существующие нормативы.

Основные понятия и термины, которые дают представление об уровне развития современной науки и технологии бетона, приводятся в [5, 6], в том числе:

- *высокопрочные бетоны (high-strength concrete)* прочностью на сжатие 80–150 МПа – для возведения каркасов высотных зданий, конструкции мостов, путепроводов и др.;
- *сверхвысокопрочные бетоны (ultrahigh-strength concrete)* прочностью на сжатие выше 150 МПа – для возведения специальных конструкций и элементов;
- *бетоны низкой проницаемости и высокой коррозионной стойкости (low-permeability and high-corrosion resistance concrete)*, не требующие «вторичной» защиты, – для возведения конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивного воздействия среды;
- *бетоны с компенсированной усадкой или самонапряжением (shrinkage compensated concrete)* – для возведения протяженных монолитных конструкций и массивных фундаментных плит;
- *самоуплотняющиеся бетоны (self-compacting concrete)*, не требующие виброуплотнения, – для возведения густоармированных конструкций сложной конфигурации;
- *порошковые бетоны (reactive powder concrete)* прочностью 180–250 МПа – для возведения мелкообъемных элементов и деталей;
- *бетон без макродефектов (macrodefect-free concrete)* пористостью менее 1 % и прочностью выше 150 МПа – для возведения мелкообъемных элементов и деталей.

Для обозначения вышеперечисленных материалов введен термин *бетоны с высокими эксплуатационными свойствами (high performance concrete)*, или сокращенно НРС, под которым понимают малоцементные, технологичные, высокопрочные и долговечные бетоны [6].

Получение и массовое производство НРС осуществилось за счет комплексного использования суперпластификаторов и высокоактивных минеральных добавок, которые, изменяя реологические характеристики смесей и структуру (фазовый состав и дифференциальную пористость) цементного камня на микро- и наноуровне [7–12], позволяют управлять свойствами бетонных смесей и бетонов и тем самым обеспечивать высокую эксплуатационную надежность конструкций в зависимости от условий их эксплуатации [7]. Вероятно, поэтому производство НРС относят к «высоким технологиям» [5].

Являющиеся основным конструкционным материалом современных сооружений, малоцементные, высокопрочные и самоуплотняющиеся бетоны с компенсированной усадкой, обладающие высокой коррозионной стойкостью, уже сейчас производятся в промышленных объемах и имеют важное практическое значение. Примеры применения НРС при возведении различных уникальных объектов за рубежом известны с конца XX века: тоннель под Ла-Маншем; мосты и путепроводы в Канаде, Китае и Японии; морские буровые платформы в Норвегии; комплексы высотных зданий в Нью-Йорке, Чикаго, Шанхае, Малайзии, на Тайване и самое высокое (828 м) в мире здание «Бурдж-Халифа» в Объединенных Арабских Эмиратах.

Сверхвысокопрочные, порошковые и бетоны без макродефектов являются материалами, которые производятся в несопоставимо меньших объемах и, по существу, представляют собой концептуальные направления развития технологии бетона.

Ситуация в России

Рассмотрим, как на фоне мирового опыта выглядит ситуация в России. Надо отметить, что материально-техническая и нормативная база для массового производства НРС в России была создана еще в 1996–1999 гг.

К тому моменту были разработаны и начался выпуск уникальных по составу и форме добавок на органоминеральной основе, которые сейчас известны как модификаторы серии «МБ». Благодаря тому, что в их составе содержатся все необходимые добавки для НРС, а также удобству их применения (т. е. «технологичности»), практически каждый рядовой бетонный завод оказался в состоянии производить НРС.

Модификаторы серии «МБ» – это поликомпонентные порошкообразные продукты разных типов (МБ-01, МБ-С и ЭМБЭЛИТ), подразделяющиеся в свою очередь на марки, которые содержат в своем составе микрокремнезем, золу уноса, метакаолин, суперпластификатор и регулятор твердения. В зависимости от соотношения ингредиентов отличаются потребительские свойства модификаторов и их назначение – от обеспечения высокой и сверхвысокой прочности до придания бетону специальных свойств (низкой проницаемости и повышенной коррозионной стойкости, компенсации усадки или расширения).

Использование технологичных и эффективных органоминеральных модификаторов позволило за короткий срок организовать в России массовое производство НРС общим объемом около 5 млн м³, в том числе:

- высокопрочных (В60–В100) – 1,5 млн м³;
- высокой коррозионной стойкости (W12–W20, F₁300–F₁1000) – 2,1 млн м³;
- малоцементных с низкой экзотермией (В40–В60) – 1,0 млн м³;
- с компенсированной усадкой и (или) самонапряжением (S_p0,6–S_p2,0) – 650 тыс. м³;
- из самоуплотняющихся смесей (В40–В100, РК 60–70) – 500 тыс. м³;
- высокопрочных мелкозернистых (В45–В100) – 100 тыс. м³;

– конструкционного легкого бетона (B45–B65, D1800) – 13 тыс. м³.

Строительство уникальных объектов и принятие нестандартных конструктивных решений массивных и тонкостенных густоармированных железобетонных и сталежелезобетонных конструкций сложной конфигурации потребовало использование не только бетонов с высокими физико-техническими свойствами, но и разработку новых технологий и нормативных документов.

Разработаны и широко внедрены в практику строительства новые технологии возведения конструкций уникальных сооружений:

– конструкций каркасов высотных зданий и спортивных сооружений из высокопрочных тяжелых, мелкозернистых и конструкционных легких бетонов;

– густоармированных конструкций из самоуплотняющихся смесей;

– конструкций мостов, путепроводов и тоннелей из бетонов высокой коррозионной стойкости;

– ограждающих конструкций подземной части без внешней гидроизоляции из бетонов с компенсированной усадкой и (или) самонапряжением;

– массивных фундаментных плит с повышенной термической трещиностойкостью из малоцементных бетонов с низкой экзотермией.

Среди наиболее интересных сооружений (рис. 1): комплексы высотных зданий ММДЦ «Москва-Сити» и Capital Towers; стадионы «Локомотив», «Самара Арена» и «Екатеринбург Арена»; крытый конькобежный центр в Крылатском; ТРК «Охотный ряд»; мосты и путепроводы на МКАД; Лефортовский транспортный тоннель и мост через р. Яузу на Третьем транспортном кольце; «Парящий мост» в парке «Зарядье» в Москве; конструкции фундамента турбоагрегата и свода 4-го энергоблока Белоярской АЭС; станции метрополитена «Славянский бульвар» в Москве и «Комсомольская» в Челябинске; дворец водных видов спорта в Казани; конструкции «Юмагузинского водохранилища» на р. Белая в Республике Башкортостан и другие.

Разработан и актуализирован комплекс нормативно-технической документации, позволяющий производить НРС, а также проектировать и контролировать качество конструкций из таких бетонов [13, 14], в том числе:

– ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества [15];

– ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органо-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия [16];

– ГОСТ Р 58894-2020. Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия [17];

– ГОСТ Р 59536-2021. Метакаолин для бетонов и строительных растворов. Технические условия [18];

– ГОСТ Р 59535-2021. Бетоны тяжелые и мелкозернистые, дисперсно-армированные стальной фиброй. Технические условия [19];

– ГОСТ Р 59714-2021. Смесей бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия [20];

– ГОСТ Р 59715-2022. Смесей бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний [21];

– СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [22];

– СП 311.1325800.2017. Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования [23];

– СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии [24];

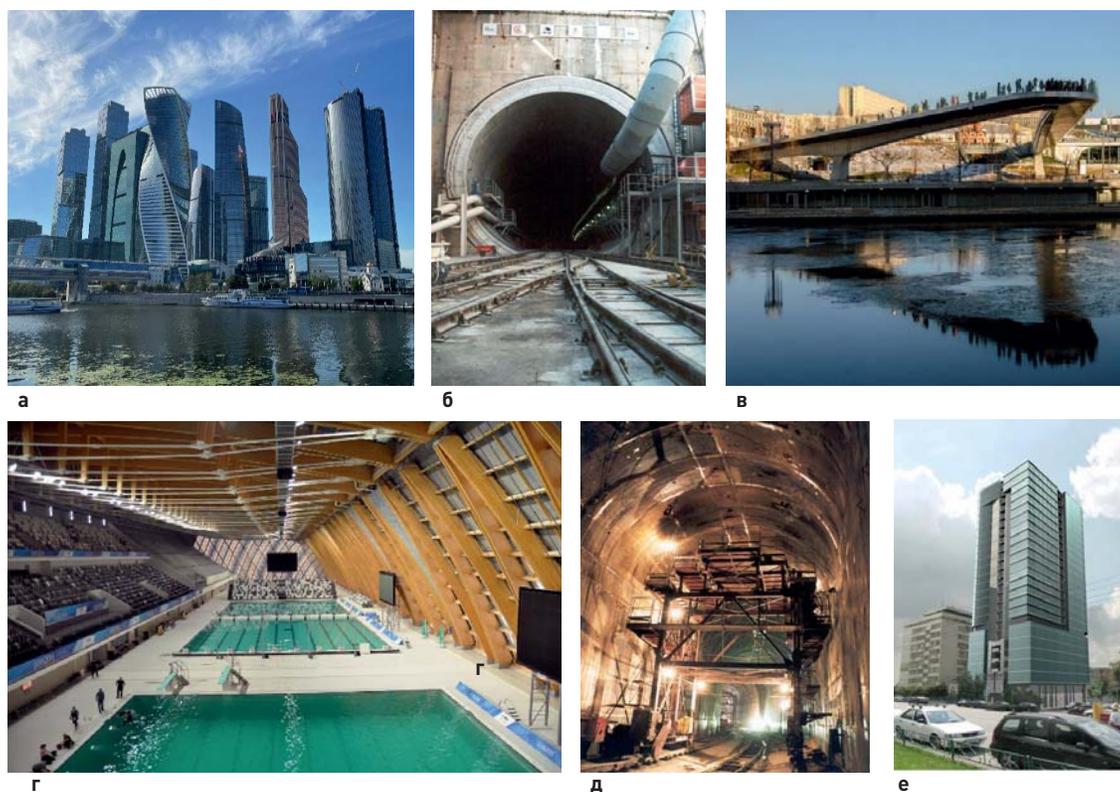


Рис. 1. Уникальные объекты строительства, в конструкциях которых использованы бетоны с высокими эксплуатационными свойствами: *а* – монолитные железо- и сталежелезобетонные конструкции каркасов высотных зданий ММДЦ «Москва-Сити» из самоуплотняющихся бетонов В60–В100; *б* – железобетонные туннели «Лефортовского» тоннеля из малоцементного бетона В45 W12 F₂300; *в* – монолитное постнапряженное пролетное строение «Парящего моста» в парке Зарядье из малоцементного самоуплотняющегося бетона В60 W16 F₂300; *г* – фундаментные плиты и три чаши бассейнов «Дворца водных видов спорта» в г. Казань из бетона В40 W12 с компенсированной усадкой; *д* – туннель донного водовыпуска «Юмагузинского водохранилища» на р. Белой из бетона В40 W16 (агрессивная среда: содержание аморфного SiO₂ в заполнителях до 101 ммоль/л, при высоком содержании (более 1 % щелочей цемента); *е* – монолитные конструкции каркаса здания «Газойл-Плаза» высотой 96 м из легкого бетона В45–В55 D1800

Fig. 1. Unique construction projects erected based on high-performance concretes: *a* – monolithic reinforced and steel-reinforced concrete structures of the frames of high-rise buildings of the Moscow International Business Center “Moscow City” from self-compacting concrete B60–B100; *b* – reinforced concrete tubings of the “Lefortovo Tunnel” made of low-cement concrete B45 W12 F₂300; *v* – monolithic post-tensioned span structure of the “Soaring Bridge” in “Zaryadye Park” made of low-cement self-compacting concrete B60 W16 F₂300; *г* – foundation slabs and three bowls of the swimming pools of the “Water Sports Palace” in Kazan made of concrete B40 W12 with compensated shrinkage; *д* – tunnel of the bottom water outlet of the “Yumaguzinsky Reservoir” on the river “Belaya” from concrete B40 W16 (aggressive environment: content of amorphous SiO₂ in aggregates up to 101 mmol/l, with a high content (more than 1 % of alkalis of cement); *e* – monolithic structures of the frame of the “Gazoil-Plaza” building, 96 m high, made of light-weight concrete B45–B55 D1800

– СП 412.1325800.2018. Конструкции фундаментов высотных зданий и сооружений. Правила производства работ [25];

– СП 250.1325800.2016. Здания и сооружения. Защита от подземных вод [26].

Реализация массового производства НРС с использованием органоминеральных модификаторов серии «МБ», объем производства которых составил более 300 тыс. т, позволила утилизировать более 270 тыс. т отходов (дымов) электрометаллургии и электроэнергетики, сэкономить около 800 тыс. т цемента, что способствовало понижению выбросов в атмосферу углекислого газа в количестве не менее 700 тыс. т и улучшению экологической обстановки.

Перспективы

В настоящее время можно выделить ряд задач, стоящих перед строительной отраслью, в частности касающихся технологии модифицированных бетонов, которые заключаются в следующем.

Исследования и разработка новых бетонов

Полученные в результате проведенных научно-исследовательских работ [27–33] и научно-технического сопровождения строительства [34–38] физико-технические характеристики НРС, представленные в табл. 1 и необходимые для расчета и проектирования конструкций, показывают, что значительная их часть требует дополнительных исследований прочностных, деформационных и коррозионных свойств тяжелых, легких, мелкозернистых, порошковых,

Таблица 1

Прочностные и деформационные характеристики НРС

Table 1

Strength and deformation characteristics of high-performance concretes (NPC)

Вид бетона	γ	Прочностные и деформационные характеристики бетона						
		R	R_b	R_{btf}	R_{bt}	E_b	ϵ_b	C
Тяжелый бетон	2380–2450	80–120	75–105	6–10	5–7	40–47	0–39	1,8–2,3
Конструкционный легкий бетон	1600–1900	58–80	50–75	4–5	2–3	21–26	–	–
Мелкозернистый бетон	2200–2300	64–115	60–105	8–10	4–7	38–45	0–74	2,0–2,5
Порошковый бетон	2300–2400	112–145	100–125	10–14	4–6	43–45	60–65	2,0–2,2
Порошковый фибробетон	2350–2450	125–150	100–130	8–23	9–11	44–49	43–55	1,3–1,7
Порошковый легкий бетон	1600–1800	65–85	–	–	–	–	–	–
Особотяжелый бетон	3500–4500	60–80	–	–	–	–	–	–
Особотяжелый бетон с фиброй	3500–4500	160–190	140–170	20–22	8–10	58–62	–	–

Примечания: γ – средняя плотность (кг/м³); R – кубиковая прочность на сжатие (МПа); R_b – призматическая прочность на сжатие (МПа); R_{btf} – прочность на растяжение при изгибе (МПа); R_{bt} – прочность на осевое растяжение (МПа); E_b – начальный модуль упругости (ГПа); ϵ_b – предельное значение деформации усадки ($\times 10^5$); C – предельное значение меры ползучести (МПа⁻¹ $\times 10^5$).

Notes: γ – average density (kg/m³); R – cubic compressive strength (MPa); R_b – prismatic compressive strength (MPa); R_{btf} – flexural tensile strength (MPa); R_{bt} – axial tensile strength (MPa); E_b – initial modulus of elasticity (GPa); ϵ_b – shrinkage strain limit ($\times 10^5$); C , creep measure limit (MPa⁻¹ $\times 10^5$).

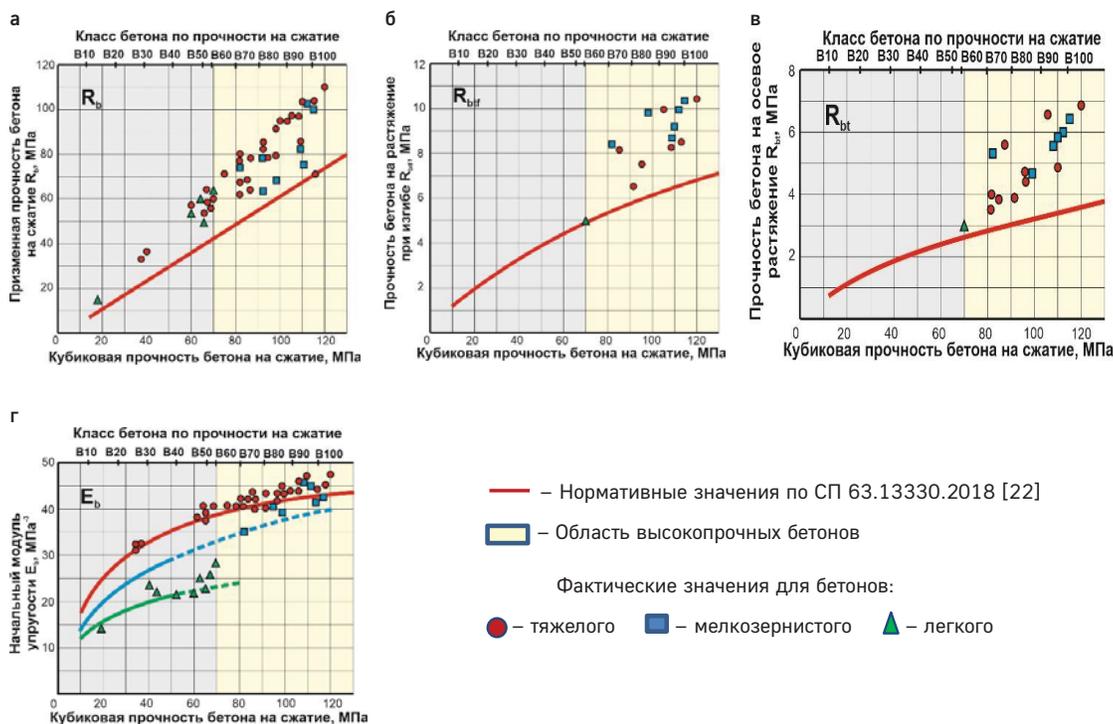


Рис. 2. Прочностные (а, б, в) и деформационные (г) характеристики НРС по сравнению с нормативными значениями по СП 63.13330.2018 [22]

Fig. 2. Strength (a, б, в) and deformation (г) characteristics of HPC compared to standard values according to SP 63.13330.2018 [22]

особотяжелых высокопрочных бетонов и фибробетонов из самоуплотняющихся смесей, в том числе:

- облегченных тяжелых бетонов В50–В80, D2000–D2100 с заданными деформационными характеристиками;
- конструкционных легких бетонов В45–В70, D1600–D1800;
- порошковых мелкозернистых и легких бетонов В60–В170, D1600–D2300;
- сталефибробетонов классов B_f100 – B_f170 , $B_{fbt}6$ – $B_{fbt}8$, $B_{fbt}10$ – $B_{fbt}20$;
- особотяжелых бетонов классов В60–В100, D3500–D4500.

Полученные высокие технико-экономические показатели и эксплуатационные характеристики НРС [7, 14, 34–38] говорят об эффективности, надежности и значительном потенциале технологии производства бетонов, основанной на применении комплексных органоминеральных модификаторов серии «МБ», что позволяет рекомендовать ее к широкому применению при проектировании и строительстве зданий и сооружений.

Утилизация техногенных отходов

Распространение технологии производства НРС на основе органоминеральных модификаторов позволит довести возможный объем утилизации отходов электрометаллургических производств и тепловых электростанций в России до 6 млн т/год, что будет способствовать экономии цемента в объеме 10 млн т/год и предотвращению выбросов в атмосферу углекислого газа до 9 млн т/год.

Актуализация нормативных документов

Сравнение фактических прочностных и деформационных характеристик новых модифицированных бетонов с высокими эксплуатационными свойствами, полученных в работах [6, 7, 11, 27, 28, 30–32, 34, 35], с нормативными значениями по СП 63.13330.2018 [22] приведено на рис. 2.

Представленные результаты показывают, что необходима актуализация нормируемых характеристик и разработка новых принципов расчета и проектирования железобетонных конструкций с использованием всех видов высокопрочных бетонов, в том числе:

– уточнение нормативных прочностных характеристик высокопрочных бетонов R_b , R_{br} , R_{brf} , а также коэффициентов надежности γ_b и условий работы γ_{b3} с учетом их фактических значений и обеспечения надежности конструкций;

– дополнение о возможности варьирования начального модуля упругости тяжелого бетона E_b одного класса по прочности на сжатие за счет технологических факторов (вида крупного заполнителя);

– расширение верхней границы параметрического ряда и нормативных значений модуля упругости E_b для высокопрочных конструкционных легких и мелкозернистых бетонов с класса В40 до классов В60 и В100 соответственно.

Список литературы

1. Батраков В.Г. Модифицированные бетоны. Теория и практика. Москва: Технопроект; 1998.
2. Каприелов С.С. Общие закономерности формирования структуры цементного камня и бетона с добавкой ультрадисперсных материалов. Бетон и железобетон. 1995;{4}:16–20.
3. Рамачандран В.С., Фельдман Р.Ф., Колепарди М., Мальхотра В.М., Долч В.Л., Мехта П.К., и др. Добавки в бетон. Справочное пособие. Москва: Стройиздат; 1998.
4. Malhotra V.V. Innovative Applications of Superplasticizers in Concrete – A Review. In: Cabrera J.G., Rivera-Villarreal R., eds. The Role of Admixtures in High Performance Concrete. Proceeding of the International Symposium. RILEM Publications; 1997, pp. 421–460.
5. Mather B. Concrete. In: Neville A.M., Malhotra V.M., eds. Adam Neville Symposium on Concrete Technology. American Concrete Institute, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, CANMET/ACI International Symposium. Las Vegas, USA; 1995, pp. 1–9.
6. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Новые бетоны и технологии в конструкциях высотных зданий. Высотные здания. 2007;{5}:94–101.
7. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С. Новые модифицированные бетоны. Москва: Парадиз; 2010.
8. Шейнфельд А.В. Особенности формирования иерархической микро- и наноструктуры цементных систем с комплексными органоминеральными модификаторами. Бетон и железобетон. 2016;{2}:16–21.
9. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В. Некоторые особенности механизма действия органоминеральных модификаторов на цементные системы. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017;{1}:40–47.
10. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Дондуков В.Г. Цементы и добавки для производства высокопрочных бетонов. Строительные материалы. 2017;{11}:4–10.
11. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Дондуков В.Г. Модифицированные высокопрочные мелкозернистые бетоны с улучшенными деформативными характеристиками. Бетон и железобетон. 2006;{2}:2–7.
12. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кузнецов Е.Н. Влияние органоминерального модификатора МБ-50С на структуру и деформативность цементного камня и высокопрочного бетона. Бетон и железобетон. 2003;{3}:2–7.

13. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Кардунян Г.С., Чилин И.А. О подборе составов высококачественных бетонов с органоминеральными модификаторами. *Строительные материалы*. 2017;(12):58–63.
14. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Киселева Ю.А. Особенности системы контроля качества высокопрочных бетонов. *Строительные материалы*. 2012;(2):63–67.
15. ГОСТ 31914-2012. Бетоны высокопрочные тяжелые и мелкозернистые для монолитных конструкций. Правила контроля и оценки качества. Москва: Стандартинформ; 2014.
16. ГОСТ Р 56178-2014. Модификаторы органико-минеральные типа МБ для бетонов, строительных растворов и сухих смесей. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2015.
17. ГОСТ Р 58894-2020. Микрокремнезем конденсированный для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2020.
18. ГОСТ Р 59536-2021. Метакаолин для бетонов и строительных растворов. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2021.
19. ГОСТ Р 59535-2021. Бетоны тяжелые и мелкозернистые, дисперсно-армированные стальной фиброй. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2021.
20. ГОСТ Р 59714-2021. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Технические условия. Москва: Российский институт стандартизации; 2021.
21. ГОСТ Р 59715-2022. Смеси бетонные самоуплотняющиеся. Методы испытаний. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
22. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Стандартинформ; 2019.
23. СП 311.1325800.2017. Бетонные и железобетонные конструкции из высокопрочных бетонов. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2018.
24. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/456069587>
25. СП 412.1325800.2018. Конструкции фундаментов высотных зданий и сооружений. Правила производства работ. Москва: Стандартинформ; 2019.
26. СП 250.1325800.2016. Здания и сооружения. Защита от подземных вод. [интернет]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200138448>
27. Карпенко Н.И., Каприелов С.С., Кузнецов Е.Н., Шейнфельд А.В., Безгодков И.В. Меры ползучести высокопрочных бетонов на основе МБ. *Вестник отделения строительных наук Российской академии архитектуры и строительных наук*. 2004;(8):203–214.
28. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кузнецов Е.Н. О регулировании модуля упругости и ползучести высокопрочных бетонов с модификатором МБ-50С. *Бетон и железобетон*. 2003;(6):8–12.
29. Kapriyelov S.S., Sheynfeld A.V., Chilin I.A., Bezgodov I.M. Properties of Ultra-High-Strength Self-Compacting Fiber-Reinforced Concrete. In: SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018). Moscow, Russia, June 6–7, 2018, pp. 60.1–60.7. <https://doi.org/10.14359/51711043>
30. Kapriyelov S., Sheynfeld A., Selyutin N. Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18(1):24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
31. Bezgodov I., Kapriyelov S., Sheynfeld A. Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18(2):175–183. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183>
32. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Селютин Н.М. Самоуплотняющийся высокопрочный керамзитобетон классов В50–В65 – новое поколение легких бетонов для конструкций высотных зданий. *Строительные материалы*. 2023;(4):42–50. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
33. Шейнфельд А.В. Органоминеральные модификаторы как фактор, повышающий долговечность железобетонных конструкций. *Бетон и железобетон*. 2014;(3):16–21.
34. Каприелов С.С., Травуш В.И., Шейнфельд А.В., Карпенко Н.И., Кардунян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные бетоны нового поколения в сооружениях ММДЦ «Москва-Сити». *Строительные материалы*. 2006;(10):8–12.

35. Каприелов С.С., Травуш В.И., Карпенко Н.И., Шейнфельд А.В., Кардумян Г.С., Киселева Ю.А., Пригоженко О.В. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. Строительные материалы. 2008;(3):9–13.
36. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С. Опыт производства и контроля качества высокопрочных бетонов на строительстве высотного комплекса «ОКО» в ММДЦ «Москва-Сити». Промышленное и гражданское строительство. 2018;(1):18–24.
37. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Аль-Омаис Д., Зайцев А.С., Амиров Р.А. Технология возведения конструкций каркасов высотных зданий из высокопрочных бетонов классов В60–В100. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;33(2):106–121. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121)
38. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов. Строительные материалы. 2022;(10):41–51. <https://doi.org/10.31659/0585-403X-2022-807-10-41-51>

References

1. *Batrkov V.G.* Modified Concrete. Theory and Practice. Moscow: Texnoproekt Publ.; 1998. (In Russian).
2. *Kaprielov S.S.* General patterns of formation of the structure of cement stone and concrete with the addition of ultrafine materials. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 1995;(4):16–20. (In Russian).
3. *Ramachandran V.S., Feldman R.F., Colepardi M., Malhotra V.M., Dolch V.L., Mehta P.K., et al.* Additives in concrete. A reference guide. Moscow: Stroyizdat; 1998. (In Russian).
4. *Malhotra V.V.* Innovative Applications of Superplasticizers in Concrete – A Review. In: *Cabrera J.G., Rivera-Villarreal R.*, eds. The Role of Admixtures in High Performance Concrete. Proceeding of the International Symposium. RILEM Publications; 1997, pp. 421–460.
5. *Mather B.* Concrete. In: *Neville A.M., Malhotra V.M.*, eds. Adam Neville Symposium on Concrete Technology. American Concrete Institute, Canada Centre for Mineral and Energy Technology, CANMET/ACI International Symposium. Las Vegas, USA; 1995, pp. 1–9.
6. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V.* New Concretes and Technologies in Structures of Tall Buildings. *Vysotnye Zdaniya = Tall Buildings*. 2007;(5):94–101. (In Russian).
7. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S.* New Modified Concretes. Moscow: Paradiz Publ.; 2010. (In Russian).
8. *Sheinfeld A.V.* Features of the formation of a hierarchical micro- and nanostructure of cement systems with complex organo-mineral modifiers. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2016;(2):16–21. (In Russian).
9. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V.* Some Features of Organic-Mineral Modifiers Action on Cement Systems. *Seismostoikoe Stroitel`stvo. Bezopasnost` sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2017;(1):40–47. (In Russian).
10. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Dondukov V.G.* Cements and additives for the production of high-strength concrete. *Stroitel`nye materialy = Construction Materials*. 2017;(11):4–10. (In Russian).
11. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Dondukov V.G.* Modified high-strength fine-grained concrete with improved deformation characteristics. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2006;(2):2–7. (In Russian).
12. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kuznetsov E.N.* Influence of the organomineral modifier MB-50C on the structure and deformability of cement stone and high-strength concrete. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete*. 2003;(3):2–7. (In Russian).
13. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Chilin I.A.* On the selection of compositions of high-quality concretes with organo-mineral modifiers. *Stroitel`nye materialy = Construction Materials*. 2017;(12):58–63. (In Russian).
14. *Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V.* Features of the quality control system for high-strength concrete. *Stroitel`nye materialy = Construction Materials*. 2012;(2):63–67. (In Russian).
15. State Standard 31914-2012. High-strength heavy-weight and fine-grane concretes for situ-casting structures. Rules for control and quality assessment. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
16. State Standard R 56178-2014. Modifiers of organic-mineral origin of MB type for concretes, mortars and dry mixes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).

17. State Standard R 58894-2020. Silica fume for concretes and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).
18. State Standard R 59536-2021. Metakaolin for concretes and mortars. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. (In Russian).
19. State Standard R 59535-2021. Heavy-weight and fine-grained dispersed-reinforced concretes with steel fiber. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. (In Russian).
20. State Standard R 59714-2021. Self-compacting concrete mixtures. Specifications. Moscow: Russian Standardization Institute; 2021. (In Russian).
21. State Standard R 59715-2022. Self-compacting fresh concrete. Methods of testing. Moscow: Russian Standardization Institute; 2022. (In Russian).
22. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
23. SP 311.1325800.2017. High strength concrete and reinforced high strength concrete structures. Design guideline. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
24. SP 28.13330.2017. Protection against corrosion of construction. Updated version of SNiP 2.03.11-85 [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/456069587> (In Russian).
25. SP 412.1325800.2018. Design of foundations of high-rise buildings and structures. Work rules. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
26. SP 250.1325800.2016. Building and structures. Protection against groundwater [internet]. Available at: <https://docs.cntd.ru/document/1200138448> (In Russian).
27. *Karpenko N.I., Kapriyelov S.S., Kuznetsov E.N., Sheinfeld A.V., Bezgodov I.M.* Creep measures for high-strength concretes based on MB. *Vestnik otdeleniya stroitel'nykh nauk Rossiiskoi akademii arkhitektury i stroitel'nykh nauk.* 2004;(8):203–214. (In Russian).
28. *Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kuznetsov E.N.* On the regulation of the modulus of elasticity and creep of high-strength concrete with the MB-50C modifier. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete.* 2003;(6):8–12. (In Russian).
29. *Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A., Bezgodov I.M.* Properties of Ultra-High-Strength Self-Compacting Fiber-Reinforced Concrete. In: *SP-326: Durability and Sustainability of Concrete Structures (DSCS-2018).* Moscow, Russia, June 6-7, 2018, pp. 60.1–60.7. <https://doi.org/10.14359/51711043>
30. *Kapriyelov S., Sheinfeld A., Selyutin N.* Control of heavy concrete characteristics affecting structural stiffness. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2022;18(1):24–39. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-1-24-39>
31. *Bezgodov I., Kapriyelov S., Sheinfeld A.* Relationship between strength and deformation characteristics of high-strength self-compacting concrete. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering.* 2022;18(2):175–183. <https://doi.org/10.22337/2587-9618-2022-18-2-175-183>
32. *Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Selyutin N.M.* Self-compacting high-strength expanded clay concrete of classes B50–B65 – a new generation of expanded clay concrete for structures of high-rise buildings. *Stroitel'nye materialy = Construction materials.* 2023;(4):42–50. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-812-4-42-50>
33. *Sheinfeld A.V.* Organomineral modifiers as a factor that increases the durability of reinforced concrete structures. *Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete.* 2014;(3):16–21. (In Russian).
34. *Kapriyelov S.S., Travush V.I., Sheinfeld A.V., Karpenko N.I., Kardumyan G.S., Kiselyova Yu.A., Prigozhenko O.V.* Modified Concretes of a New Generation in Buildings of «Moscow city». *Stroitel'nye materialy = Construction Materials.* 2006;(10):8–12. (In Russian).
35. *Kapriyelov S.S., Travush V.I., Karpenko N.I., Sheinfeld A.V., Kardumyan G.S., Kiseleva Yu.A., Prigozhenko O.V.* Modified high-strength concretes of classes B80 and B90 in monolithic structures. *Stroitel'nye materialy = Construction Materials.* 2008;(3):9–13. (In Russian).
36. *Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Al Omair D., Zaitsev A.S.* Experience in the Production and Quality Control of High-Strength Concrete in Construction of Tall Buildings Complex «УКО» in “Moscow City» Business Center. *Promyshlennoye i grazhdanskoye stroitel'stvo = Industrial And Civil Engineering.* 2018;(1):18–24. (In Russian).
37. *Kapriyelov S.S., Sheinfeld A.V., Al Omair Dzh., Zaitsev A.S., Amirov R.A.* A technology of erecting high-rise building frame structures using B60–B100 classes high-strength concretes. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction.* 2022;33(2):106–121. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-106-121](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-106-121)

38. *Kapriellov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A.* Optimization of technology parameters to ensure thermal crack resistance of massive foundations. *Stroitel' nye materialy = Construction Materials*. 2022;(10):41–51. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-403X-2022-807-10-41-51>

Информация об авторах / Information about the authors

Семен Суменович Каприелов, д-р техн. наук, заведующий лабораторией № 16 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: kapriellov@masterbeton-mb.ru
тел.: +7 (499) 171-05-73

Semyon S. Kapriellov, Dr. Sci. (Engineering), Head of Laboratory No. 16, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: kapriellov@masterbeton-mb.ru
tel.: +7 (499) 171-05-73

Андрей Владимирович Шейнфельд✉, д-р техн. наук, заместитель заведующего лабораторией № 16 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru
тел.: +7 (499) 174-76-35

Andrey V. Sheynfeld✉, Dr. Sci. (Engineering), Deputy Head of Laboratory No. 16, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: sheynfeld@masterbeton-mb.ru
tel.: +7 (499) 174-76-35

Игорь Анатольевич Чилин, инженер, научный сотрудник лаборатории № 16 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: chilin@masterbeton-mb.ru
тел.: +7 (499) 174-76-06

Igor A. Chilin, Engineer, Researcher of Laboratory No. 16, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: chilin@masterbeton-mb.ru
tel.: +7 (499) 174-76-06

Виктор Геннадиевич Дондуков, инженер, научный сотрудник лаборатории № 16 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: dondukov@masterbeton-mb.ru
тел.: +7 (499) 174-76-06

Viktor G. Dondukov, Engineer, Researcher of Laboratory No. 16, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: dondukov@masterbeton-mb.ru
tel.: +7 (499) 174-76-06

Никита Михайлович Селютин, инженер, научный сотрудник лаборатории № 16 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: selyutin@masterbeton-mb.ru
тел.: +7 (499) 174-76-06

Nikita M. Selyutin, Engineer, Researcher of Laboratory No. 16, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: selyutin@masterbeton-mb.ru
tel.: +7 (499) 174-76-06

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.87, 693.554

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-105-116](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-105-116)

EDN: ORPAWU

ВЛИЯНИЕ СТЕПЕНИ КОРРОЗИОННОГО ПОРАЖЕНИЯ АРМАТУРЫ НА СОВМЕСТНУЮ РАБОТУ С БЕТОНОМ

В.Ф. СТЕПАНОВА, д-р техн. наук

Н.А. СПИВАК[✉], канд. техн. наук

Е.Н. КОРОЛЕВА

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. Статья посвящена исследованиям возможности использования стальной арматуры, содержащей следы коррозии, определению максимальной степени коррозионного поражения арматуры. Хотя многолетние исследования показали, что арматуру, пораженную коррозией, допустимо использовать при изготовлении железобетонных конструкций, в различных исследованиях и нормативных документах приводятся различные условия использования такой арматуры, установлен разный порог поражения (толщина слоя ржавчины на поверхности арматуры).

Целью работы являлось определение максимальной толщины слоя ржавчины на поверхности профилированной арматуры, при которой сохраняются физико-механические характеристики арматуры и не нарушается способность совместной работы с бетоном. Определение степени коррозионного поражения арматуры, при котором допустимо ее использование в железобетоне для уточнения действующих нормативных документов по защите строительных конструкций от коррозии.

Материалы и методы. Экспериментальные исследования проводились на образцах арматуры классов А500 и А800 с различной степенью коррозионного поражения, толщиной слоя ржавчины 0, 150, 250, 300 мкм. Для определения совместной работы с бетоном использовался бетон классов В15 и В20. Определение физико-механических характеристик арматуры с различной толщиной слоя ржавчины проводили по методике ГОСТ 12004-81 на образцах арматуры диаметром 12 мм, длиной 400 мм. Определение стойкости арматурной стали к коррозионному растрескиванию проводили по методике ГОСТ 31383-2008 на образцах арматуры диаметром 12 мм, длиной 400 мм. Определение пассивирующего действия бетона по отношению к стальной арматуре проводили по методике ГОСТ 31383-2008 на бетонных образцах-призмах размерами 70 × 70 × 140 мм с арматурой диаметром 12 мм, длиной 120 мм в центре. Определение сцепления арматуры с бетоном проводили по методике ГОСТ 31938-2012 на бетонных образцах-кубах с ребром 150 мм, с арматурой диаметром 12 мм, длиной 500 мм в центре.

Результаты. Результатом исследований являются экспериментальные данные по физико-механическим характеристикам арматуры с разной степенью коррозионного поражения, данные по стойкости арматурной стали к коррозионному растрескиванию, данные по пассивирующему действию бетона двух классов по отношению к стальной арматуре с разной степенью коррозионного поражения, данные по сцеплению арматуры разной степенью коррозионного поражения с бетоном двух классов.

Выводы. В рамках работы подготовлена и реализована программа экспериментальных исследований, которая включала изготовление и испытание образцов арматуры двух классов с четырьмя степенями коррозионного поражения с использованием бетона двух классов. По результатам экспериментальных исследований было определено влияние коррозионного поражения арматуры различной степени на характеристики железобетона.

Сделан вывод о том, что наличие слоя ржавчины на поверхности арматуры толщиной до 150 мм не ухудшает ее физико-механические характеристики, не снижает стойкость к коррозионному растрескиванию, не ухудшает совместную работу с бетоном. Дальнейшее увеличение толщины слоя ржавчины на поверхности арматуры снижает эти характеристики, кроме сцепления с бетоном. Зависимости напряжения сцепления бетона с арматурой от толщины слоя ржавчины не наблюдалось.

Ключевые слова: арматура, арматурная сталь, степень коррозионного поражения, допустимые параметры, сцепление с бетоном, долговечность железобетонных конструкций

Для цитирования: Степанова В.Ф., Спивак Н.А., Королева Е.Н. Влияние степени коррозионного поражения арматуры на совместную работу с бетоном. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):105–116. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-105-116](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-105-116)

Вклад авторов

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

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

Королева Е. Н. – анализ результатов исследований.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.12.2023

Поступила после рецензирования 26.12.2023

Принята к публикации 18.01.2024

EFFECT OF THE DEGREE OF CORROSION DAMAGE IN REINFORCING BARS ON COMPOSITE ACTION WITH CONCRETE

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

N.A. SPIVAK✉, Cand. Sci. (Engineering)

E.N. KOROLEVA

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

Abstract

Introduction. The article examines the possibility of using steel reinforcement with instances of corrosion and determines the maximum degree of corrosion damage in reinforcing bars (rebars). Although long-term studies show that corroded reinforcement can be used in the manufacture of reinforced concrete structures, some studies and regulatory documents provide different conditions for the use of such rebars, as well as establishing different corrosion thresholds (thickness of the rust layer on the rebar surface).

Aim. To determine the maximum thickness of the rust layer on the surface of corrugated rebars, at which the physicomechanical characteristics of reinforcement are preserved and the capability for composite action with concrete is not hampered; to determine the degree of corrosion damage in rebars at which its use in reinforced concrete is permissible in order to revise the existing regulatory documents on the protection of structures against corrosion.

Materials and methods. The experimental studies were conducted on rebar specimens of two classes (A500 and A800) exhibiting different degrees of corrosion damage (rust layer thickness of 0, 150, 250, and 300 μm). In order

to determine the composite action with concrete, B15 and B20 concrete was used. The physicomaterial characteristics of rebars with different rust layer thicknesses were determined on rebar specimens having a diameter of 12 mm and length of 400 mm according to the procedure specified in State Standard 12004-81. The reinforcing steel resistance to corrosion cracking was determined on rebar specimens having a diameter of 12 mm and a length of 400 mm as per the procedure given in State Standard 31383-2008. The passivating effect of concrete on steel reinforcement was determined on concrete specimens — 70 × 70 × 140 mm prisms, with rebars having a diameter of 12 mm and a length of 120 mm in the center — according to the procedure given in State Standard 31383-2008. The bond between rebars and concrete was determined on concrete specimens-cubes (150 mm on edge), with rebars having a diameter of 12 mm and a length of 500 mm in the center — using the procedure specified in State Standard 31938-2012.

Results. The study yielded experimental data on the physicomaterial characteristics of rebars exhibiting different degrees of corrosion damage; on the resistance of reinforcing steel to corrosion cracking; data on the passivating effect of concrete of two classes on steel rebars exhibiting different degrees of corrosion damage; data on the bond between rebars corroded to various degrees and concrete of two classes.

Conclusions. As part of the work, an experimental research program was developed and implemented, which involved the production and testing of rebar specimens of two classes exhibiting four degrees of corrosion damage with the use of concrete of two classes and. The experimental study results were used to determine the effect of corrosion damage of varying degree in rebars on the characteristics of reinforced concrete.

The presence of a rust layer on the rebar surface of up to 150 mm in thickness was found not to degrade its physicomaterial characteristics, not to decrease its resistance to corrosion cracking, and not to reduce its composite action with concrete. Any further increase in the thickness of the rust layer on rebar surface reduces these characteristics, except for the bond to concrete. No dependence of rebar-concrete bond stress on the rust layer thickness was observed.

Keywords: reinforcement, reinforcing steel, corrosion damage degree, permissible parameters, bond to concrete, durability, reinforced concrete structures

For citation: Stepanova V.F., Spivak N.A., Koroleva E.N. Effect of the degree of corrosion damage in reinforcing bars on composite action with concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):105–116. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-105-116](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-105-116)

Author contribution statements

Stepanova V.F. – test program development, analysis of study results.

Spivak N.A. – design and conduct of experimental studies, analysis of study results.

Koroleva E.N. – analysis of study results.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Received 04.12.2023

Revised 26.12.2023

Accepted 18.01.2024

Введение

В производстве железобетонных конструкций около 30% по массе составляет арматура. Очень часто арматуру к месту строительства доставляют морским или речным транспортом и хранят на открытых складах. Такой транспорт и длительное хранение арматуры

на строительной площадке способствуют интенсивному развитию атмосферной коррозии. Интенсивность атмосферной коррозии зависит от продолжительности соприкосновения влаги с поверхностью, от метеоусловий, прежде всего от влажности воздуха, длительности пребывания электролита на металлической поверхности, состава атмосферы, температуры воздуха, физико-химических свойств продуктов коррозии. Разрушение арматуры в бетоне может иметь характер язвенного поражения ее отдельных участков либо равномерного уменьшения сечения по всей поверхности. Последнее более характерно и возникает вследствие перехода слоев металла в продукты коррозии в результате образования микропар, имеющих катодные участки меньшей площади, чем анодные. Такое явление наблюдается в карбонизированном бетоне или при воздействии на него других агрессивных сред. В тех случаях, когда площадь катодных участков превышает площадь анодных, на арматуре появляются отдельные пятна – язвы. Язвенная коррозия арматуры образуется при неравномерном проникновении в бетон хлоридов, разрушающих пассивирующую пленку на поверхности арматуры. Более опасна язвенная коррозия арматуры, так как при ней местное уменьшение сечения арматуры происходит значительно быстрее. Особенно опасна язвенная коррозия в предварительно напряженных конструкциях, где для армирования бетона используют высокопрочную арматуру [1–3].

Монолитное строительство, как правило, не имеет возможности организовать условия для хранения арматуры и не может прогнозировать длительность ее хранения. Такое положение приводит к развитию коррозии на стальной арматуре, что в свою очередь приводит к изменению ее состояния в зависимости от степени поражения. Изменение состояния поверхности арматуры, подвергшейся коррозии, играет большую роль в ее совместной работе с бетоном. Прочность сцепления между арматурой и бетоном в основном определяется химической адгезией, сцеплением и трением на поверхности арматуры. Когда арматура начинает подвергаться коррозии, на поверхности арматуры постепенно образуется ржавчина, которая изменяет характеристики поверхности гладкого арматурного стержня. Трение между арматурой и прочностью бетона значительно повышаются, поэтому адгезия может увеличиться в 2–3 раза после того, как арматура начнет подвергаться коррозии [4]. Также было установлено, что средний уровень коррозии не оказал существенного влияния на прочность сцепления, но имеет место существенное снижение сцепления, когда после этого коррозия увеличилась до более высокого уровня [5]. Неопределенность в определении безопасной степени коррозионного поражения арматуры просматривается, и разные трактовки этого отражены в нормативных документах. Так, в СП 229.1325800.2014 [2], СП 28.13330.2017 [6], ГОСТ 10922-2012 [7] установлены различные пределы степени коррозионного поражения стальной арматуры. В связи с этим проведение комплекса уточняющих исследований по данной тематике является актуальным и имеет значительный практический интерес.

Цель: проведение экспериментальных исследований по оценке влияния степени коррозионного поражения арматуры на совместную работу с бетоном, выявление предпосылок для совершенствования системы градостроительной деятельности в части уточнения и дополнения действующих нормативных документов по защите строительных конструкций от коррозии.

Материалы и методы

В 2023 году в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева выполнена работа по исследованию влияния степени коррозионного поражения арматуры на свойства железобетона.

Для экспериментальных исследований были изготовлены и испытаны 60 образцов арматуры А500 и 60 образцов арматуры А800 с различной толщиной ржавчины (степенью коррозии): 0, 150, 250, 300 мкм. Так как в естественных условиях стальная арматура корродирует недостаточно быстро, для ускоренной коррозии была использована камера солевого тумана – модель DCTCT 1200P. На основании многолетнего опыта за величину поражения арматуры коррозией принята толщина слоя ржавчины на поверхности арматурного стержня. В проведенных исследованиях применен способ измерения слоя ржавчины на поверхности стальной арматуры периодического профиля без нарушения слоя с помощью прибора MT AKASCAN 20.07, область применения которого – измерение тонких диэлектрических пленок на поверхности электропроводных ферромагнитных материалов. Показания прибора MT AKASCAN 20.07 проверены и согласуются с показаниями нескольких методов определения толщины слоя ржавчины: механическая очистка, весовой метод с химической очисткой.

Определение физико-механических характеристик арматуры с различной толщиной слоя коррозии проводили по методике ГОСТ 12004-81 [8]. Для испытаний были изготовлены образцы арматуры одной партии класса А500 диаметром 12 мм, длиной 400 мм в количестве 12 шт. и образцы арматуры одной партии класса А800 диаметром 12 мм, длиной 400 мм – 12 шт. Три образца арматуры каждого класса, контрольные, не подвергали коррозии. Остальные подвергали ускоренной коррозии. Для каждого образца арматуры были определены физико-механические характеристики. Результаты испытаний приведены в табл. 1 и 2.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что слой ржавчины на поверхности арматуры толщиной до 150 мкм не влияет на физико-механические характеристики арматуры. Увеличение толщины слоя ржавчины приводит к снижению физико-механических характеристик арматурной стали, по некоторым показателям – ниже нормативных.

Определение стойкости арматурной стали к коррозионному растрескиванию проводили по методике ГОСТ 31383-2008 [9]. Для испытаний были приготовлены образцы арматуры

Таблица 1

Физико-механические характеристики арматуры класса А500 с разной толщиной слоя коррозии

Table 1

Physicomechanical characteristics of A500 rebars with different corrosion layer thicknesses

Физико-механическая характеристика	Нормативное значение	Толщина слоя ржавчины, мкм			
		0	150	250	300
$\sigma_{0,2}$ – предел текучести (условный), Н/мм ²	≥ 500	589,8	585,7	537,8	520,7
σ_B – временное сопротивление, Н/мм ²	≥ 600	719,7	721,7	656,0	606,3
δ_s – относительное удлинение после разрыва, %	≥ 14	26	25,7	15,7	13,7
δ_p – равномерное относительное удлинение, %	≥ 2,0	10	9,7	5	4
δ_{max} – полное относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	≥ 2,5	10,4	10,3	6,7	4,7

Таблица 2

Физико-механические характеристики арматуры класса А800 с разной толщиной слоя коррозии

Table 2

Physicomechanical characteristics of A800 rebars with different corrosion layer thicknesses

Физико-механическая характеристика	Нормативное значение	Толщина слоя ржавчины, мкм			
		0	150	250	300
$\sigma_{0,2}$ – предел текучести (условный), Н/мм ²	≥ 800	1004,7	999,6	781,7	696,8
σ_B – временное сопротивление, Н/мм ²	≥ 1000	1134,3	1132,2	849,3	818,0
δ_s – относительное удлинение после разрыва, %	≥ 8,0	17,3	15,3	14,7	13,3
δ_p – равномерное относительное удлинение, %	≥ 2,0	4,7	4,3	3,3	2
δ_{max} – полное относительное удлинение при максимальной нагрузке, %	≥ 2,5	5,3	5,0	3,7	2,5

одной партии класса А500 диаметром 12 мм, длиной 400 мм в количестве 12 шт. и образцы арматуры одной партии класса А800 диаметром 12 мм, длиной 400 мм в количестве 12 шт. Шесть образцов арматуры каждого класса, контрольные, не подвергали коррозии. Остальные подвергали ускоренной коррозии. Все образцы арматуры были испытаны на стойкость к коррозионному растрескиванию.

Контрольные образцы и образцы с толщиной слоя ржавчины 150 мкм арматуры класса А500 показали хорошую стойкость к коррозионному растрескиванию, все указанные образцы выдержали напряжение $R = 0,9 \times \sigma_{0,2}$ в течение 100 часов. Измерение прочностных показателей арматуры после испытаний показало, что слой ржавчины толщиной до 150 мкм не влияет на стойкость арматурной стали к коррозионному растрескиванию, временное сопротивление уменьшилось незначительно (1%). Дальнейшее увеличение толщины слоя ржавчины привело к значительному уменьшению стойкости арматурной стали к коррозионному растрескиванию. По одному образцу с толщиной слоя ржавчины 250 и 300 мкм не выдержали 100 ч испытаний при напряжении $R = 0,9 \times \sigma_{0,2}$. У образцов, выдержавших 100 ч, прочностные показатели, определенные после испытаний, значительно снизились, временное сопротивление уменьшилось на 20–25% по сравнению с контрольными образцами.

Контрольные образцы арматуры класса А800 с толщиной слоя ржавчины 150 мкм показали одинаковую стойкость арматурной стали к коррозионному растрескиванию – 46–48 ч. Образцы арматуры класса А800 с толщиной слоя ржавчины 250 и 300 мкм показали значительное снижение стойкости арматурной стали к коррозионному растрескиванию – 20–30 ч, что ниже контрольных образцов на 40–50%.

По результатам проведенных испытаний можно сделать вывод о том, что слой ржавчины на поверхности арматуры толщиной до 150 мкм не влияет на стойкость арматурной стали к коррозионному растрескиванию. Увеличение толщины слоя ржавчины приводит к значительному снижению стойкости арматурной стали к коррозионному растрескиванию.

Определение пассивирующего действия бетона по отношению к стальной арматуре проводили по методике ГОСТ 31383-2008 [9]. Для испытаний были изготовлены образцы арматуры одной партии класса А500 диаметром 12 мм, длиной 120 мм в количестве 72 шт. и образцы арматуры одной партии класса А800 диаметром 12 мм, длиной 120 мм в количестве

72 шт. Восемнадцать образцов арматуры каждого класса, контрольные, не подвергали коррозии. Остальные подвергали ускоренной коррозии. Для испытаний были приготовлены два вида бетонной смеси. Из бетонной смеси двух составов были изготовлены контрольные образцы-кубы с ребром 100 мм по 6 шт. для испытаний по ГОСТ 10180-2012 [10] и образцы для испытаний по ГОСТ 31383-2008 [9] – призмы размерами 70 × 70 × 140 мм с арматурным стержнем в центре. Класс бетона был определен по ГОСТ 18105-2018 [11]. Таким образом были изготовлены образцы для испытаний. Все образцы были испытаны на пассивирующее действие бетона по отношению к стальной арматуре.

Результаты испытаний приведены в табл. 3–6.

Контрольные образцы (без следов коррозии) арматуры бетона обоих классов имеют на момент электрохимических испытаний неустойчивое пассивное состояние по плотности тока при потенциале +300 мВ и пассивное состояние по потенциалу через (60 ± 5) секунд после отключения тока.

Образцы арматуры обоих классов стали со слоем ржавчины 150 мкм в бетоне обоих классов на момент электрохимических испытаний имеют также неустойчивое пассивное состояние по плотности тока при потенциале +300 мВ и пассивное состояние по потенциалу через (60 ± 5) секунд после отключения тока.

Образцы арматуры обоих классов со слоем ржавчины 250 и 300 мкм в бетоне обоих классов на момент электрохимических испытаний имеют состояние интенсивной коррозии по плотности тока при потенциале +300 мВ и активное состояние коррозии по потенциалу через (60 ± 5) секунд после отключения тока.

Таблица 3

Характеристики пассивирующего действия бетона класса В15 по отношению к стальной арматуре А500 с разной толщиной слоя коррозии

Table 3

Passivating effect of B15 concrete on A500 steel rebars with different corrosion layer thicknesses

Характеристика пассивирующего действия бетона	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Плотность тока при потенциале +300 мВ, мкА/см ²	11,8	21,6	> 2000	> 2000
Потенциал через (60 ± 5) с после отключения тока, мВ	+261	+38	-46	-30

Таблица 4

Характеристики пассивирующего действия бетона класса В20 по отношению к стальной арматуре А500 с разной толщиной слоя коррозии

Table 4

Passivating effect of B20 concrete on A500 steel rebars with different corrosion layer thicknesses

Характеристика пассивирующего действия бетона	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Плотность тока при потенциале +300 мВ, мкА/см ²	12,4	19,6	> 2000	> 2000
Потенциал через (60 ± 5) с после отключения тока, мВ	+270	+39	-27	-31

Таблица 5

Характеристики пассивирующего действия бетона класса В15 по отношению к стальной арматуре А800 с разной толщиной слоя коррозии

Table 5

Passivating effect of B15 concrete on A800 steel rebars with different corrosion layer thicknesses

Характеристика пассивирующего действия бетона	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Плотность тока при потенциале +300 мВ, мкА/см ²	13,2	21,2	> 2000	> 2000
Потенциал через (60 ± 5) с после отключения тока, мВ	+307	+49	-46	-47

Таблица 6

Характеристики пассивирующего действия бетона класса В20 по отношению к стальной арматуре А800 с разной толщиной слоя коррозии

Table 6

Passivating effect of B20 concrete on A800 steel rebars with different corrosion layer thicknesses

Характеристика пассивирующего действия бетона	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Плотность тока при потенциале +300 мВ, мкА/см ²	11,4	18,9	> 2000	> 2000
Потенциал через (60 ± 5) с после отключения тока, мВ	+322	+53	-16	-26

Определение сцепления арматуры с бетоном проводили по методике ГОСТ 31938-2012 [12]. Для испытаний были изготовлены образцы арматуры одной партии класса А500 диаметром 12 мм, длиной 500 мм – 48 шт. и образцы арматуры одной партии класса А800 диаметром 12 мм, длиной 500 мм – 48 шт. Шесть образцов арматуры каждого класса, контрольные, не подвергали коррозии. Остальные подвергали ускоренной коррозии. Для испытаний были приготовлены два вида бетонной смеси. Из бетонной смеси составов № 1 и 2 были изготовлены контрольные кубы с ребром 100 мм по 6 шт. для испытаний по ГОСТ 10180-2012 [10] и образцы для испытаний по ГОСТ 31938-2012 [12] – кубы с ребром 150 мм с арматурным стержнем в центре. Класс бетона был определен по ГОСТ 18105-2018 [11]. Таким образом были изготовлены образцы для испытаний. Все образцы были испытаны на сцепление арматуры с бетоном. Результаты испытаний приведены в табл. 7–10.

Только образцы арматуры класса А500 с бетоном класса В20 имеют тенденцию к снижению сцепления при увеличении толщины слоя ржавчины на поверхности арматуры. В остальных трех сериях образцов зависимость между сцеплением и толщиной слоя ржавчины на поверхности арматуры не наблюдается.

По результатам испытаний на сцепление стальной арматуры с бетоном можно сделать вывод, что сцепление арматуры с бетоном остается на одном уровне для разных классов арматуры и бетона и не зависит от степени коррозионного поражения арматуры до толщины ржавчины 300 мкм.

Таблица 7

Показатели сцепления арматуры класса А500 с разной толщиной слоя ржавчины с бетоном класса В15

Table 7

Bond between A500 rebars with different corrosion layer thicknesses and B15 concrete

Показатели сцепления	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Напряжение сцепления, МПа	17,4	17,8	16,1	18,3

Таблица 8

Показатели сцепления арматуры класса А500 с разной толщиной слоя ржавчины с бетоном класса В20

Table 8

Bond between A500 rebars with different corrosion layer thicknesses and B20 concrete

Показатели сцепления	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Напряжение сцепления, МПа	17,5	17,9	16,3	16,3

Таблица 9

Показатели сцепления арматуры класса А800 с разной толщиной слоя ржавчины с бетоном класса В15

Table 9

Bond between A800 rebars with different corrosion layer thicknesses and B15 concrete

Показатели сцепления	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Напряжение сцепления, МПа	12,8	16,4	17,2	13,7

Таблица 10

Показатели сцепления арматуры класса А800 с разной толщиной слоя ржавчины с бетоном класса В20

Table 10

Bond between A800 rebars with different corrosion layer thicknesses and B20 concrete

Показатели сцепления	Толщина слоя ржавчины, мкм			
	0	150	250	300
Напряжение сцепления, МПа	13,5	15,6	16,9	15,8

Заключение

Проведены испытания арматуры с различной степенью коррозионного поражения, определена зависимость физико-механических свойств арматуры от степени ее коррозионного поражения и на зависимость сцепления с бетоном арматуры с различной степенью коррозионного поражения.

Показано, что слой ржавчины на поверхности арматуры толщиной до 150 мкм не влияет на физико-механические характеристики арматуры и стойкость к коррозионному растрескиванию, арматура в бетоне находится в неустойчивом пассивном состоянии. Увеличение толщины слоя ржавчины свыше 150 до 300 мкм приводит к снижению физико-механических характеристик и стойкости к коррозионному растрескиванию арматурной стали для двух исследованных классов арматуры А500, А800, также арматура переходит в активное состояние интенсивной коррозии. Экспериментально не установлено влияние степени коррозионного поражения арматуры на сцепление ее с бетоном.

Список литературы

1. СП 130.13330.2018. Производство сборных железобетонных конструкций и изделий. Москва: Стандартинформ; 2019.
2. СП 229.1325800.2014. Железобетонные конструкции подземных сооружений и коммуникаций. Защита от коррозии. Москва: Минстрой России; 2015.
3. Розенфельд И.Л. Атмосферная коррозия металлов. Москва: Изд. АН СССР; 1960.
4. Wong H.S., Karimi A.R., Buenfeld N.R., Zhao Y.X., Jin W.L. On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion. *Corrosion Science*. 2010;52(7):2469–2480. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.025>
5. Sulaimani G.J, Kaleemullah K., Basunbul I.A, Rasheeduzzafar M. Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. *ACI Structural Journal*. 1990;87(2):220–231. <https://doi.org/10.14359/2732>
6. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. Москва: Минстрой России; 2017.
7. ГОСТ 10922-2012. Арматурные и закладные изделия, их сварные, вязаные и механические соединения для железобетонных конструкций. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2013.
8. ГОСТ 12004-81. Сталь арматурная. Методы испытания на растяжение. Москва: Стандартинформ; 2009.
9. ГОСТ 31383-2008. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Методы испытаний. Москва: Стандартинформ; 2010.
10. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ; 2013.
11. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. Москва: Стандартинформ; 2019.
12. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2014.

References

1. SP 130.13330.2018. Precast concrete production. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
2. SP 229.1325800.2014. Reinforced concrete structures of underground and utility systems. Protection against corrosion. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2015. (In Russian).

3. *Rosenfeld I.L.* Atmospheric corrosion of metals. Moscow: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1960. (In Russian).
4. *Wong H.S., Karimi A.R., Buenfeld N.R., Zhao Y.X., Jin W.L.* On the penetration of corrosion products from reinforcing steel into concrete due to chloride-induced corrosion. *Corrosion Science*. 2010;52(7):2469–2480. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2010.03.025>
5. *Sulaimani G.J., Kaleemullah K., Basunbul I.A., Rasheeduzzafar M.* Influence of corrosion and cracking on bond behavior and strength of reinforced concrete members. *ACI Structural Journal*. 1990;87(2):220–231. <https://doi.org/10.14359/2732>
6. SP 28.13330.2017. Protection against corrosion of construction. Updated version of SNiP 2.03.11-85. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2017. (In Russian).
7. State Standard 10922-2012. Welded reinforcing products and inserts, welded, lap and mechanical joints for reinforced concrete structures. General specifications. Moscow: Standardinform Publ.; 2013. (In Russian).
8. State Standard 12004-81. Reinforcing-bar steel. Tensile test methods. Moscow: Standardinform Publ.; 2009. (In Russian).
9. State Standard 31383-2008. Protection against corrosion of concrete and reinforced concrete constructions. Test methods. Moscow: Standardinform Publ.; 2010. (In Russian).
10. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standardinform Publ.; 2013. (In Russian).
11. State Standard 18105-2018. Concretes. Rules for control and assessment of strength. Moscow: Standardinform Publ.; 2019. (In Russian).
12. State Standard 31938-2012. Fibre-reinforced polymer bar for concrete reinforcement. General specifications. Moscow: Standardinform Publ.; 2014. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Валентина Федоровна Степанова, д-р техн. наук, профессор, заведующий лабораторией коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: vfstepanova@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-75-80

Valentina F. Stepanova, Dr. Sci. [Engineering], Professor, Head of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: vfstepanova@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-75-80

Николай Александрович Спивак[✉], канд. техн. наук, заведующий сектором лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: nisan.52@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-37

Nikolai A. Spivak[✉], Cand. Sci. [Engineering], Head of the Sector of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: nisan.52@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-76-37

Елена Никитична Королева, старший научный сотрудник сектора лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: tamaximova@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-75-77

Elena N. Koroleva, Senior Researcher, Sector of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: tamakximova@mail.ru
tel.: +7 (499) 174-75-77

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 929

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-117-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-117-133)

EDN: ZKPZRO

ЧУДО-КЛЕЙ, ЗАМЕНИВШИЙ ДЕФИЦИТНЫЙ МЕТАЛЛ

А.Л. КАЛИНИЧЕНКО

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

Аннотация

Введение. В статье на архивных материалах рассказывается о малоизвестном факте периода Великой Отечественной войны 1941–1945 гг., а именно о научном открытии специалистами Центрального научно-исследовательского института (ЦНИПС), связанном с созданием рецептуры строительного клея «ЦНИПС-2». С его помощью в трудный для страны период промышленность наладила выпуск новых строительных материалов, а в подразделениях Красной армии мастера-оружейники, находящиеся на передовой линии фронта, оперативно восстанавливали стрелковое оружие, вышедшее из строя в боях с врагом.

Цель: ввести в научный оборот материалы архивных источников по истории создания нового строительного материала «ЦНИПС-2», а также информацию об отдельных результатах научных исследований автора чудо-клея – старшего научного сотрудника, кандидата технических наук Марии Наумовны Плунганской, длительный период трудившейся в лаборатории деревянных конструкций.

Материалы и методы. При подготовке публикации использовались архивные материалы по актуальной теме. Благодаря им, а также с помощью ретроспективного, историко-типологического и сравнительного методов исследования автор проследил отдельные стороны сложного пути создания нового клея, уточнил его состав, порядок приготовления и использование в промышленных масштабах.

Результаты. В статье изучены и показаны отдельные этапы создания формулы клея «ЦНИПС», позволившие (благодаря холодному-сыхому схватыванию) промышленности обеспечить производство строительной фанеры различной толщины и высокого качества в больших объемах для строительной отрасли, других конструкций из дерева, которые заменяли дефицитный металл. Описан порядок и правила практического применения мастерами-оружейниками клея «ЦНИПС-2» вне стационарных условий (как говорится, в окопе) для успешного восстановления деревянных деталей винтовок и автоматов (приклад, цевьё и т. д.), оперативного возвращения в подразделения тысячи единиц оружия.

Выводы. Содержание статьи послужит наглядной иллюстрацией в научно-учебном контексте о традициях и деятельности научных школ институтов АО «НИЦ «Строительство», их вкладе в исследовательскую область по созданию новых строительных материалов для повышения могущества страны.

Исследовательская работа ученых института имела большое практическое значение, предложив строительной промышленности новые типы легких индустриальных сборно-разборных конструкций высокой транспортабельности, их многие достижения эффективно использовались на фронте для достижения Великой Победы.

В стране в период 1930–1940 гг. широко развернувшееся строительство требовало, с одной стороны, высококачественных конструктивных решений, с другой – простоты и экономичности их осуществления. В этих условиях особое значение приобретали клеевые и клеефанерные конструкции, обеспечивающие индустриализацию заготовки деревянных строительных деталей и экономичность использования лесоматериалов в строительстве.

Полученные исследователем М.Н. Плунганской важные свойства клея «ЦНИПС-2» – водостойкость и долговечность, а также простота и удобство обращения с ним – позволили применять материал в заводских условиях для склейки корпусов деревянных судов, клееных конструкций, деталей вагонов,

нефтепроводов из шпона или тонкой фанеры, а также в боевых условиях для изготовления и ремонта стрелкового оружия и т. д., тем самым привнес значительный экономический эффект, расширив возможности его применения в отечественной промышленности.

Ключевые слова: Великая Отечественная война 1941–1945 гг., строительный клей «ЦНИПС-2», М.Н. Плунгянская, строительная промышленность, ремонт стрелкового оружия, глицерин, полихлорид бензола, исследователь, Г.Г. Карлсен

Для цитирования: Калиниченко А.Л. Чудо-клей, заменивший дефицитный металл. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;40(1):117–133. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-117-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-117-133)

Вклад авторов

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

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 19.12.2023

Поступила после рецензирования 21.01.2024

Принята к публикации 25.01.2024

A WONDER ADHESIVE FOR REPLACING THE SCARCE METAL

A.L. KALINICHENKO

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

Abstract

Introduction. Based on archival materials, the article follows a little-known fact of the Great Patriotic War 1941–1945, namely, the scientific discovery by the specialists of the Central Research Institute (TsNIPS), related to the creation of the formulation for the TsNIPS-2 construction adhesive. With its help, in a difficult period for the country, the industrial production of new construction materials was established and Red Army gunsmiths, located on the front line, quickly restored small arms that went out of action in battles with the enemy.

Aim. To introduce into a scientific discourse the materials of archival sources on the history of creating a TsNIPS-2 new construction material, as well as on the individual research results of its inventor – a senior researcher, Cand. Sci. (Engineering) Maria N. Plungyanskaya, who worked for a long period in the TsNIPS Laboratory of Timber Structures.

Materials and methods. Archival materials on the current topic were used in the preparation of the publication. Due to them, as well as with the help of retrospective, historical-typological and comparative research methods, the author traced certain aspects of the complex path of creating a new adhesive by clarifying its composition, order of preparation and industrial application.

Results. The article studies and shows the individual stages of creating the TsNIPS adhesive formula, which ensured (due to cold-dry setting) the large-volume industrial production of high quality construction plywood of various thicknesses for the construction industry, as well as other timber structures that replaced the scarce metal. The procedure and rules for the practical use of the TsNIPS-2 adhesive by gunsmiths beyond the limits of stationary conditions (“in a trench”) for the successful restoration of wooden parts in rifles and assault rifles (butt, forearm, etc.), as well as the prompt return of thousands of weapons to the units are described.

Conclusions. The content of the article will serve as a vivid illustration in the scientific and educational context about the traditions and activities of scientific schools, presented by the institutes of JSC Research Center

of Construction, their contribution to the research field on the creation of new construction materials for increasing the power of the country. The research work of the Institute's scientists was of a great practical importance, offering the construction industry new types of light industrial collapsible structures with a high transportability, their numerous achievements were effectively used at the front to achieve the Great Victory. In the period of 1930–1940, the construction, widely developed in the country, required, on the one hand, high-quality design solutions and, on the other hand, the simplicity and economy of their implementation. In these conditions, adhesive and laminated plywood structures were of a particular importance, ensuring the industrialization of the wooden construction part production and the cost-effectiveness of using timber in construction. The important properties of the TsNIPs-2 adhesive, obtained by the researcher M.N. Plungyanskaya, including water resistance and durability, as well as simplicity and ease of its handling, made it possible to use the material in industry for assembling the hulls of wooden ships, producing laminated structures, parts of cars, and oil pipelines, made of veneer or thin plywood, as well as in combat conditions for the manufacture and repair of small arms, etc., thereby bringing a significant economic effect and expanding the possibilities of its use in the domestic industry.

Keywords: The Great Patriotic War of 1941–1945, TsNIPs-2 construction adhesive, M.N. Plungyanskaya, construction industry, small arm repair, glycerine, benzene polychloride, researcher, G.G. Karlsen

For citation: Kalinichenko A.L. A wonder adhesive for replacing the scarce metal. *Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;40(1):117–133. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1\(40\)-117-133](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-1(40)-117-133)

Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Received 19.12.2023

Revised 21.01.2024

Accepted 25.01.2024

Введение

Научное изобретение – строительный клей «ЦНИПС-2», запатентованное [1] кандидатом технических наук Марией Наумовной Плунгянской, обладало высокими техническими качествами. Материал отличался особой добротностью склейки, даже превышающей прочность цельной древесины. Важные свойства клея – водостойкость и долговечность, а также простота и удобство обращения с ним – позволили применять материал в заводских условиях для склейки корпусов деревянных судов, клееных конструкций, деталей вагонов, нефтепроводов из шпона или тонкой фанеры, а также в боевых условиях для изготовления и ремонта стрелкового оружия и т. д.

Практическое внедрение клея «ЦНИПС-2» в годы Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. подтвердило превосходные результаты для его широкого использования не только в стационарных, но и в походных полевых условиях. Специалисты отмечали преимущество отечественного материала по сравнению с заграничными клеями для древесины. Примечательно, что применение клея «ЦНИПС-2» сильно расширило возможности конструктивного



Рис. 1. Знамя Великой Победы. Фотохроника ТАСС. Май, 1945 г.
Fig. 1. The Great Victory Banner. TASS photo report. May, 1945

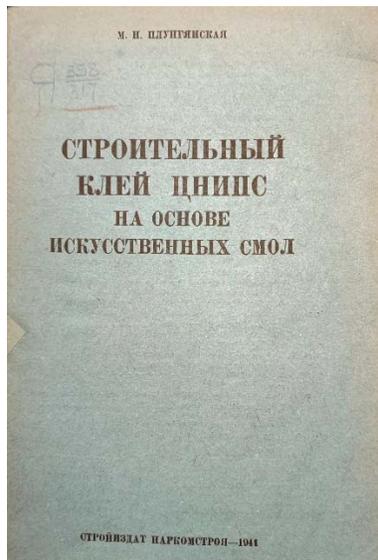


Рис. 2. Обложка книги «Строительный клей ЦНИПС на основе искусственных смол», 1941 г. [2]
Fig. 2. Cover of the "TsNIPS construction adhesive, based on artificial resins" book, 1941 [2]

использования дерева, во многих случаях заменившего дефицитный в ту пору металл, что сказалось на повышении производительности труда в отрасли, а также существенной экономии финансовых средств, привнеся элементы инноваций в развитие отечественной промышленности.

Непростой путь создания рецептуры нового клея, разработка технологического режима его изготовления, изучения физико-механических свойств материала и внедрения в промышленность изложены М.Н. Плунгянской в книге «Строительный клей ЦНИПС на основе искусственных смол» [2].

В книге подведены итоги работ по изучению физико-механических свойств клеев «ЦНИПС-1» и «ЦНИПС-2», разработанных в лаборатории деревянных конструкций, и клеевых сопряжений на них. Автором подробно изложен технологический процесс изготовления клеев и их компонентов, даны проекты технических условий материала и его применение. Актуальная для того времени тема была предназначена для инженеров, научных сотрудников, мастеров и практиков, работавших в области строительной и клеевой промышленности.

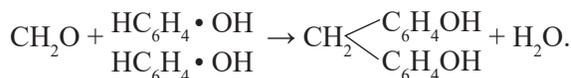
Важный момент для развития промышленности в военное и послевоенное время – внедренный клей «ЦНИПС-2» позволил результативно использовать в производстве отходы древесины для изготовления дефицитных деталей и элементов строительных конструкций. Так, в системе Наркомата путей сообщения (НКПС) и Наркомата морского флота (НМФ) отсутствие лесоматериала крупных сечений ставило под угрозу выпуск новой продукции. В итоге применение склейки клеем «ЦНИПС-2» позволило из отходов и маломерного лесоматериала получать детали нужных сечений, при этом достигая их высокой прочности.

Создание формулы клея

Для исследователя М.Н. Плунгянской и ее единомышленников путь познания материй в строительной науке оказался весьма сложным и тернистым. Чтобы успешно пройти его, ученому понадобилось десять лет: от придумки формулы нового клея до научного подтверждения и применения в промышленности.

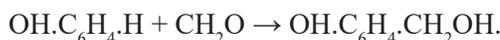
Теоретические предпосылки, определившие методику работы исследователей над новым материалом, заключались в следующем: «В процессе конденсации фенола с формальдегидом образуются два типа соединений: диоксифенилметан и фенолоспирт.

Диоксифенилметан образуется при взаимодействии двух молей фенола с одним молем формальдегида по следующему управлению:



При этом происходит интрамолекулярная конденсация с выделением элементов воды.

Фенолоспирт получается при взаимодействии эквимолекулярных количеств фенола и формальдегида без отщепления воды по следующей реакции:



Эти соединения представляют собой начальные продукты конденсации, переходящие при нагревании в смолы, отличные друг от друга по химической структуре и по свойствам» [2].

Работа по изысканию рецептуры клея сводилась к подбору отвердителя, обладавшего следующими свойствами:

- способностью переводить смолу в резит при нормальной температуре;
- способностью обеспечить жизнеспособность клея не менее 4 ч;
- способностью давать после затвердения продукт высокой прочности и водостойкости.

Механические свойства клея специалисты определяли на стационарных образцах: на изгиб и сжатие – в аппарате Амслера; на разрыв – на машине Михаелиса, применяя дробь определенного диаметра (рис. 3).

Минимальная величина коэффициента крепости на разрыв должна быть ниже 15 кг/см² при среднем значении 20 кг/см².

Вычисление коэффициента крепости на разрыв производили по формуле:

$$= \frac{P \cdot 50}{\text{кг/см}^2},$$

где P – разрушающая нагрузка;

- площадь склейки в см²;
- коэффициент прочности на разрыв» [3].

Долговечность клеевых сопряжений в условиях длительной службы строительных конструкций, исчисляемой десятками лет, приобретает особое значение. Известно, что наиболее реальным критерием для суждения о долговечности клея является испытание во времени. С этой целью исследователи в мае 1937 г. на клею «ЦНИПС-1» изготовили серию образцов дуба на скалывание для периодического испытания в течение ряда лет, которые подтвердили: «Ежемесячное испытание этих образцов в течение 3,5 года выявило, что влияние времени

1605

1/2
- 2 -

$$= \frac{P \cdot 50}{2} \text{ кг/см}^2 \text{ шири}$$

- где P - разрывная нагрузка
- площадь склейки в см²
- коэффициент прочности на разрыв.

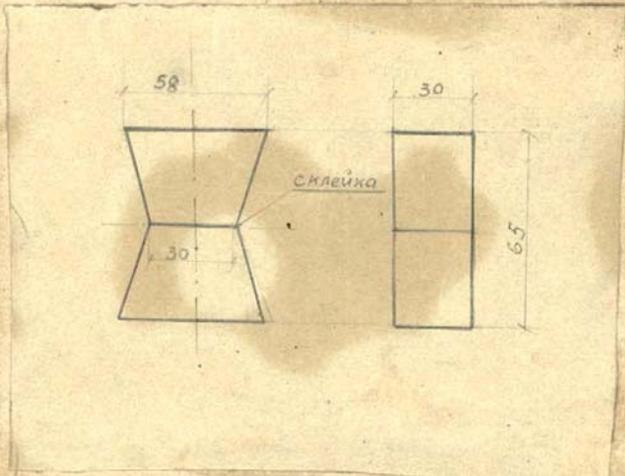


Рис. № 3

Все испытания после фиксации составлением акта, который подписывается техническим приемщиком или уполномоченным лицом.

Подлинник отается у приемщика, копия вручается поставщику.

В случае спорных вопросов поставщику предоставляется право отсылать пробу для контрольного испытания в одну из государственных лабораторий, по согласованию с приемщиком.

Сидур

Рис. 3. Вычисление коэффициента крепости на разрыв [3]
Fig. 3. Calculation of the tensile strength factor [3]

не отражается на прочности клеевого шва, поскольку разрыв, как правило, происходил по древесине» [2].

В продолжение исследований в течение 1937–1939 гг. клей «ЦНИПС-1» испытывался в лабораторных и производственных условиях (клееные балки для межэтажных перекрытий, строительная фанера и т. п.), при этом «выявились его высокая прочность, водостойкость и долговечность» [2].

«Однако наряду с положительными качествами клей «ЦНИПС-1» обладал существенным недостатком – запахом формальдегида, особенно ощутимым при нанесении жидкого клея на склеиваемую поверхность. После затвердевания клея запах совершенно исчезал» [2]. Наличие запаха создавало серьезные затруднения при работе с клеем, требовалась вентиляция помещений, где проводились работы с клеем.

«Рецептура клея 1939 г., видоизмененная в направлении уменьшения содержания формалина в отвердителе, проверенная в производственных условиях, показала вполне удовлетворительные физико-механические свойства модифицированного клея» [2].

Говоря о компонентах клея (фенол, формалин и контакт Петрова), дефицитным в стране являлся только фенол, по которому исследователи активно проводили изыскания по его замене.

Ученые стремились соблюдать условия приготовления клея, к примеру, «компоненты берутся по весу, а не по объему. Глицерин и серная кислота предварительно смешиваются в отношении 10:1 и прибавляются согласно вышеуказанной рецептуре в виде смеси. Непосредственно после смешивания клей представляет собой жидкость коричневого цвета, вязкость которого зависит от вязкости взятой смолы» [2].

Чтобы закрепить свой успех, кандидат технических наук М.Н. Плунгянская, получив удивительный по свойствам новый материал, продолжала, как говорится, шлифовать свое изобретение, работая в различных приемлемых условиях, даже соглашаясь участвовать в кустарном и полузаводском производстве деревянных строительных конструкций, где исследователь на практике регулировала сроки схватывания клеевой смеси, повышала жизнеспособность смолы, боролась с образованием «козла», с выделением вредных испарений при намазывании клея и т. д. Она на практике требовательно и жестко проверяла крепость и вместе с тем эластичность клеевого шва, добивалась полной водостойкости и грибоустойчивости материала и т. д.

Война, к сожалению, осложнила ученым исследовательскую работу. Так, по причине большого дефицита глицерина им пришлось срочно искать замену этому важному компоненту. Настойчивая Плунгянская нашла выход из, казалось, тупиковой ситуации [4]. Она в 1943 г. опытным путем подобрала заменитель ставшему дефицитным глицерину, компоненту в составе клея «ЦНИПС», в виде полихлорида бензола, имевшегося в промышленности в больших количествах, являющегося в ту пору не утилизируемым отходом химического производства.

Предложенное М.Н. Плунгянской применение полихлорида бензола позволило в том же 1943 году начать широкое применение клея «ЦНИПС» в самых разнообразных сферах производства. Преимущества, которыми обладал разработанный М.Н. Плунгянской клей «ЦНИПС» по сравнению с другими клеями для древесины: водостойкость, грибоустойчивость, холодная полимеризация и безвредность, – вскоре побудили исследователей начать его внедрение не только в строительстве, но и в других областях промышленности, в том числе в период послевоенного восстановления народного хозяйства.

К примеру, статистика подтверждает, что в военный период в значительной мере были истощены имеющиеся в стране запасы высокосортного-крупномерного лесного сырья. С появлением «ЦНИПС-2» промышленность массово перешла на эффективное использование суковатого маломерного лесоматериала, изготавливая клеевые монолитные конструкции и стройдетали. Коробчатые клеевые настилы, клеевые арочные конструкции, сборные утепленные кровельные блоки и клефанерные конструкции и щиты в значительной мере способствовали успешному разрешению весьма сложных проблем послевоенного жилищного и промышленного строительства. Важным материалом на стройплощадках страны была водостойкая клееная фанера. Таким образом, клей «ЦНИПС» позволил (благодаря холодному-сухому схватыванию) обеспечить производство строительной фанеры различной толщины и высокого качества в больших объемах [4], что дало строительной отрасли значительный экономический эффект.

Примечательно, что себестоимость клея «ЦНИПС-2» в военный период – около 5 руб. за килограмм [3]. Для использования его в промышленных масштабах вполне подходящая цена по сравнению с ценами на продукты в военное время: крупа пшеничная – 2,1 руб. / 80–150 руб. за 1 кг; хлеб ржаной – 85 коп. / 25–100 руб. за 1 кг; чай грузинский 1-го сорта – 80 руб. / 600–750 руб. за 1 кг; шоколадные конфеты «Весна» – 20 руб. / 350–850 руб. за 1 кг; масло подсолнечное – 13,5 руб. / 250–600 руб. за 1 л; говядина – 10–12 руб. / 150–400 руб. за 1 кг.

Как клей помогал фронту

В военные годы руководство строительного ведомства страны получало в основном положительные отклики на изобретения исследователей института. В одном из них заместитель директора Центрального научно-исследовательского института механической обработки дерева (ЦНИИМОД) докладывал в декабре 1943 г. начальнику Технического управления Наркомстроя инженеру-полковнику Стомахину: «Сообщаем, что институтом закончена работа по внедрению клея «ЦНИПС-2», разработанного старшим научным сотрудником ЦНИПС М.Н. Плунгянской, и замазок ЦНИИМОД на его основе для ремонта деревянных частей стрелкового вооружения.

Клей утвержден и внедрен по линии РАУКА для массового ремонта в фронтовых ремонтных органах.

Высокое качество склейки, полученное при применении клея «ЦНИПС-2», простота и удобство обращения с ним обеспечивают возврат в боевое действие дефектного оружия путем непосредственного ремонта его в боевых условиях.

За разработку методов ремонта, внедрения клея «ЦНИПС-2» и замазок ЦНИИМОД имеется ряд благодарностей от командования фронтов» [4].

Директор ЦНИПС доктор технических наук, профессор Б.Г. Скрамтаев, в свою очередь, получив множество положительных откликов с фронта об успешном применении клея, а также от профильных научно-исследовательских организаций, поддерживая научное открытие, выдвинул достижение М.Н. Плунгянской на соискание Сталинской премии в области науки и изобретательства, отметив: «...создана рецептура прочного водостойкого и грибоустойчивого клея для склейки деревянных элементов. Применение клея «ЦНИПС» в военном деле обеспечивает возврат в боевое действие поврежденного стрелкового

оружия, а применение его в строительстве и других отраслях промышленности позволяет использовать отходы и низкие сорта древесины, дает экономию лесоматериала и замену металла» [4].

Изобретение М.Н. Плунгянской поддержали видные ученые, среди которых инженер-полковник доктор технических наук, профессор Г.Г. Карлсен: «Многолетний труд М.Н. Плунгянской (почти 10 лет) над созданием рецептуры и технологии строительного клея – в 1943 году увенчался удачным использованием его в разнообразных областях военного хозяйства.

Непосредственная помощь фронтам Великой Отечественной войны: успешное использование клея «ЦНИПС» для ремонта спецдеталей (ГАУКА), для склейки корпусов деревянных корпусов деревянных судов (Наркомморфлота), для производства и ремонта вагонов (НКПС) для производства и ремонта лыж (ГНУКА) и др. – являются лучшим доказательством эффективности и актуальности работы М.Н. Плунгянской. Дальнейшая научно-исследовательская работа над совершенствованием и удешевлением клея «ЦНИПС» – несомненно еще будет продолжаться, но в основном задача разработки строительного клея – водостойкого, грибоустойчивого и применяемого в строительных (и даже в военно-строительных) условиях и масштабах – на сегодня решена успешно. Широкое внедрение клея «ЦНИПС» в военно-строительную промышленность за 1943 г. – позволяет оценить и премировать труд М.Н. Плунгянской – как крупное достижение в области науки и изобретательства» [4].

Примечательно, что Генрих Генрихович Карлсен в бытность его заведующим и научным руководителем сектора деревянных конструкций ГИС (ЦНИПС) дальновидно, еще в 1935 году, ставил задачу коллегам – создать водостойкий и грибоустойчивый строительный клей. Он вспоминал: «На первых порах мы встретились с трудностями, казавшимися почти неразрешимыми. Только с приходом Марии Наумовны Плунгянской на работу в этой области дело сдвинулось с мертвой точки. На базе обширной эрудиции в области химии и технологии искусственных смол, с учетом достижений заграничной (и особенно американской) техники – Мария Наумовна с большой целеустремленностью и с «ломаносовской упрямкой» этап за этапом добивалась успеха» [4].

Заведующий лабораторией деревянных конструкций Юрий Михайлович Иванов, доктор технических наук, профессор, в январе 1944 г. отмечал в своем отзыве: «Разработанный М.Н. Плунгянской клей «ЦНИПС» несомненно является крупным вкладом в дело технического перевооружения строительства и промышленного производства в СССР и имеет народно-хозяйственное значение.

Работа М.Н. Плунгянской, кроме указанной практической ценности, имеет и определенную научную ценность. Клей «ЦНИПС» по существу представляет собой новый вид материала с заданными и весьма ценными свойствами» [4].



Рис. 4. Тульские ремонтники стрелкового оружия в годы войны. Фотохроника ТАСС

Fig. 4. Tula small arm repairers during the war. TASS photo report

Научный эксперимент

Успех пришел к Марии Наумовне Плунгянской после продолжительной работы в лабораторных условиях над созданием рецептуры нового материала, а также на практике в условиях производства. Этапы создания изобретения, включая проверку в условиях производства, Плунгянская последовательно отобразила в исследовательской работе «Способ ремонта существующих деревянных конструкций с помощью строительного клея «ЦНИПС-2» [3], выполненной специалистами в 1943 г. под руководством директора ЦНИПС доктора технических наук, профессора Б.Г. Скрамтаева, заведующего лабораторией деревянных конструкций доктора технических наук, профессора Ю.М. Иванова и при помощи исполнителя научного сотрудника А.С. Брука.

По техническому заданию, учитывая многолетний срок службы деревянных конструкций, клей, применяемый для их ремонта, должен был обладать важными техническими свойствами:

«1. Крепость клеевого шва после окончательного затвердевания клея должна быть не ниже крепости склеиваемой древесины на скалывание вдоль волокон и на разрыв поперек волокон.

2. Клеевой шов должен быть по возможности водостойким; вышеуказанные показатели крепости его после вымачивания должны оставаться выше показателей крепости склеиваемой древесины соответственной влажности.

3. Клеевой шов должен быть грибоустойчив, особенно в условиях эксплуатации Д.К., незащищенных от атмосферных осадков.

4. Технология применения строительного клея должна обеспечивать возможность изготовления и ремонта клеевых деталей строительного масштаба без специального прогрева их» [3].

Исследователи отмечали, что «последнее условие особенно важно при ремонте, так как позволяет производить ремонт в ходе эксплуатации, без разборки конструкции».

Клей «ЦНИПС-2» составлялся из следующих компонентов:

1. Смола «ЦНИПС-2» изготавливается на Любучанском химическом заводе, приемка производится согласно временным техническим условиям. Тарой для смолы служат деревянные бочки или стеклянные бутылки. Срок хранения смолы – не более 6 месяцев.

2. Смесь серной кислоты (уд. вес 1,84) с глицерином (ОСТ-4200, технический) в отношении 1:10 (по весу).

3. Керосиновый контакт Петрова (Ст. 2 4781) хранится в деревянных бочках или стеклянных бутылках; срок хранения – до 1 года.

4. Трикреафосфат марки 0 хранится в стеклянных бутылках; срок хранения – до 1 года.

Перед употреблением все указанные компоненты тщательно перемешивались [3].

Таким образом, из всех применяемых в тот период времени клеев: столярный, казеиновый, клейрот, альбуминовый – ни один не отвечал указанным требованиям. Как выяснилось, столярный клей и клейрот неводостойкие; казеиновый клей обладал хорошей прочностью в сухом состоянии, но уже после 48-часового вымачивания он терял 50 % своей первоначальной прочности и поэтому не применим для незащищенных конструкций.

Альбуминовые клеи не рассматривались исследователями, так как требовали в процессе склеивания подогрева.

Всем вышеуказанным требованиям отвечали клеи на основе искусственных смол. Из таких клеев холодной полимеризации были известны два – клей «ЦНИПС-2» и ВИАМ В-3.

Исследователи отмечали, что «клей ВИАМ В-3 обладает рядом недостатков, главным из которых является наличие в нем большого количества свободного фенола, вызывающего коррозию древесины, с одной стороны, и являющегося вредным для здоровья работающих – с другой» [3].

Таким образом, М.Н. Плунгянская в своем исследовании показала, что единственным из клеев, удовлетворяющим на тот период требованиям, являлся клей «ЦНИПС-2», разработанный в лаборатории деревянных конструкций (ЛДК) ЦНИПС.

Мария Наумовна на практике доказала: «Свойство этого клея приобретать любую консистенцию в зависимости от времени его выстаивания позволяет производить ремонт, как тонких трещин, так и повреждений значительной длины и ширины. Однако применение для ремонта чистого клея было бы нецелесообразным как в экономическом отношении, так и из опасения, что в толстом слое чистый клей может дать усадку» [3].

Исследователи добивались разработки композиции, «которая обладала бы хорошей адгезией к дереву, достаточной эластичностью, водостойкостью и малым различием температурных коэффициентов по сравнению с деревом. Такая композиция могла быть получена при прибавлении к клею наполнителей» [3].

Инженеры стремились получить замазку, которая явилась бы ценным материалом для заливки трещин и заполнения швов. Для этого инженеры экспериментировали с различными наполнителями, отбирая наиболее эффективные из них на испытание как чистого клея, так и клея с наполнителем в условиях эксплуатации конструкций.

Ученые проводили исследовательскую работу поэтапно. В первую очередь специалисты подбирали наполнители, испытывая их в лабораторных условиях. Затем проверяли материалы, давшие положительные результаты по методике, предложенной авторским коллективом: «трещины и другие повреждения непосредственно на эксплуатируемых конструкциях заливались как чистым клеем, так и с наполнителем, давшим положительные результаты» [3]. За отремонтированными таким образом конструкциями устанавливали наблюдение. В итоге лучшие результаты показали составы материалов, куда входили: древесная мука, ламповая сажа, графит, каолин.

После лабораторных испытаний результаты проверяли на практике непосредственно на заводе, где производили ремонт деревянных конструкций.

Опыты на производстве

Использование клея «ЦНИПС-2» вне лабораторных исследований М.Н. Плунгянская с коллегами проводила на фабрике «Красный Перекоп» в октябре 1943 г., что было подтверждено актом выполненных работ, утверждено работниками комбината, а также представителями «Текстильпроекта» и ЦНИПС. В документе подробно прописана последовательность работ: «Произведена заделка трещин 6-ти деревянных прогонов перекрытия над 1-м этажом в левом крыле фабрики № I. Трещины заделывались клеем «ЦНИПС-2» с прибавлением в качестве наполнителя древесных опилок. Клей приготавливался путем смешивания смолы «ЦНИПС-2» и отвердителя, состоящего из смеси – керосинового контакта, глицерина с серной кислотой и трикрезилфосфата» [3].

Акт свидетельствовал: «Способ ремонта прогонов замазкой «ЦНИПС-2» в производственных условиях оказался простым, легко осуществимым и вполне целесообразным.

В дальнейшем опытную работу необходимо продолжить, включив кроме заделки трещин также усиление прогонов путем наклейки досок на верхнюю плоскость прогона» [3].

Исследователями в отчете на тему «Способ ремонта существующих деревянных конструкций с помощью строительного клея «ЦНИПС-2» отмечалось, что «в деревянном жилищном и промышленном строительстве нередко случаи, когда незначительные повреждения на небольшом участке конструкций влекут за собой необходимость смены целой фермы или перекрытий» [3]. Способ, предложенный М.Н. Плунгянской, продемонстрировал возможность при небольших трудозатратах и затратах на материалы устранить имеющиеся повреждения, продлив таким образом службу всей конструкции на длительный срок.

Таким образом, смысл работ заключался «в заливке клеем «ЦНИПС» образовавшихся в балках трещин, или заполнений им же в местах плохой приторцовки стыков или, наконец, усиления конструкции накладками на клею «ЦНИПС» [3].

Вызывает интерес смета на выполнение темы «Способ ремонта деревянных конструкций при помощи клея «ЦНИПС», составленная заведующим ЛДК Ю.М. Ивановым, старшим научным сотрудником М.Н. Плунгянской, утвержденная директором института Б.Г. Скрамтаевым [3].

«Старший научный сотрудник: $20 \times 48 = 960$ руб.

Научный сотрудник: $30 \times 30 = 900$ руб.

Техник: $30 \times 20 = 600$ руб.

Столяр: $10 \times 24 = 240$ руб.

Итого: 2700 руб.

Начисление 70 % – 1900 руб.

Стоимость материалов – 100 руб.

Командировки – 300 руб.

Всего: 5000 руб.» [3].

Рекомендации по ремонту оружия и приготовления клея

В подразделениях РККА специалисты по ремонту стрелкового оружия в короткий срок приспособились к использованию чудо-клея. В помощь мастерам-оружейникам издавали различные инструкции, наставления. Так, в «Руководстве по войсковому ремонту 7,62-мм винтовки обр. 1891/30 г. и 1891 г. и карабина обр. 1938 г.» (рис. 5) [5], выпущенном в Военном издательстве Народного комиссариата обороны в 1946 г., прописан порядок применения клея для ремонта различных деревянных частей оружия.

Условия ремонта ложи винтовки обр. 1891/30 г.

«В ложе не должно быть трещин, отколов и пробоин, нарушающих ее прочность, а также вмятин, обезображивающих вид ложи.

Детали прибора, находящегося на ложе (затылок, глазки, наконечник, шурупы), должны быть укреплены прочно, без шаткости; действие пружин ложевых колец должно быть энергичное.

Затылок своей внутренней поверхностью должен плотно прилегать к прикладу ложи и не выступать из-за обреза приклада.

В ложе в результате ремонта допускается неограниченное количество вклеек любой длины, но способы крепления вклеек и применяемые материалы должны строго соответствовать указаниям настоящего раздела руководства.

Ограничение количества вклеек и их длины вводится при применении столярного клея, согласно указаниям, данным ниже» [5] (рис. 6).

Изготовление клея «ЦНИПС-2»

В рекомендациях сказано: «Клей, применяемый для постановки вклеек при ремонте ложи, должен быть водоупорен, атмосферостойчив и давать прочное склеивание древесины, пропитанной оружейным маслом.

Эксплуатационным условиям, в которых работает ложа, полностью удовлетворяет клей «ЦНИПС-2», применяемый в течение ряда лет в строительной промышленности. Применяемый столярный клей абсолютно не водоупорен и непрочен склеивает древесину, пропитанную оружейным маслом; казеиновый клей достаточно водоупорен, но также недостаточно склеивает промасленные поверхности; поэтому применение столярного и казеинового клея ограничено.

Клей «ЦНИПС-2» водоупорен, хорошо склеивает промасленную древесину, давая клеевой шов, прочность которого выше прочности древесины березы.

В состав клея «ЦНИПС-2» входит смола «ЦНИПС-2» и отвердитель. Смола «ЦНИПС-2» заготавливается УМТО ГАУ Красной Армии централизованным порядком и рассылается в ремонтные органы; хранится в стеклянных бутылках; срок хранения не ограничен.

Отвердитель для клея «ЦНИПС-2» составляется из следующих компонентов, которые высылаются в ремонтные органы УМТО ГАУ Красной Армии: серной кислоты, трикрезилфосфата, технического глицерина и керосинового контакта Петрова.

Для составления отвердителя надо взять: серной кислоты – 1 весовую часть, трикрезилфосфата – 5 весовых частей, технического глицерина – 10 весовых частей, контакта Петрова – 20 весовых частей.

Взвешенные компоненты сливаются в указанном отношении в стеклянную или эмалированную посуду и смешиваются. Хранится отвердитель в стеклянных бутылках; срок хранения 6 месяцев.

Клей «ЦНИПС-2» готовится в стеклянной, эмалированной или глиняной посуде. Смола «ЦНИПС-2» и отвердитель перед взвешиванием тщательно перемешиваются.



Рис. 5. Обложка книги «Руководство по войсковому ремонту 7,62-мм винтовки обр. 1891/30 г. и 1891 г. и карабина обр. 1938 г.» [5]
Fig. 5. "1891/30 and 1891 7.62-mm Rifle and 1938 Short Rifle Military Repair Guide" book cover [5]



Рис. 6. Винтовка 7,62-мм обр. 1891/30 г.
Fig. 6. 1891/30 7.62-mm Rifle

На 100 г смолы берется 36 г отвердителя, получается 136 г клея. Слитые в указанной пропорции смола и отвердитель смешиваются вместе и выдерживаются от 20 до 40 минут, т. е. пока клей не получит густоты сметаны и пока не появятся в нем белые разводы, что и является внешним признаком готовности клея.

Приготовленный таким образом клей при наличии в летнее время высокой температуры становится в сосуд с холодной водой, которая, охлаждая клей, понижает его способность к дальнейшему сгущению.

Загустевший клей разбавляется свежими порциями вновь приготовленного клея до нужной концентрации, после чего приобретает полностью свои клеящие свойства» [3].

Режим склеивания клея «ЦНИПС-2»

Как напоминание в тексте выделено: «Склеиваемые поверхности должны быть очищены от загрязнения и намазаны клеем при помощи лубяной кисточки с обеих сторон склеиваемых поверхностей.

Выдержки до запрессовки не требуется. Соединение плоскостей производится без притирки, запрессовка может производиться при помощи струбцин, обвязок или различного рода заклиниваний.

Выдержка перед выработкой после склейки от 20 до 24 часов при температуре в помещении от 15 °С и выше (если температура выше, выдержка меньше).

После окончания работы с клеем «ЦНИПС-2» следует:

– вымыть посуду из-под клея, так как загрязненная и невымытая вовремя посуда очень трудно очищается в дальнейшем; мыть посуду рекомендуется теплой водой, по возможности щелочной (раствор соды, слабый раствор едкого натра и пр.);

– тщательно вымыть руки теплой водой с мылом; рекомендуется также смазать руки жирами (вазелин и др.)» [3].

Неисправности ложи и их устранение

В рекомендациях для мастеров-оружейников приведены различные способы восстановления деревянных деталей оружия, в том числе приведена последовательность ремонта ложи вклейками: «При помощи столярных вклеек рекомендуются раздробления, прострелы, сквозные трещины и изломы в ложе. Размеры вклеек выбираются в зависимости от размеров повреждений, но крепление вклеек производится в каждом отдельном случае соответственно указаниям, предусмотренным в данном руководстве.

Дополнительные крепления (шпильки, шпонки, нагели) предусмотрены для тех вклеек, плоскость склеивания которых настолько мала, что не обеспечивает необходимой прочности клеевого соединения вклейки с древесиной ложи.

Допускается из бракованных лож вырезка целых частей (цевья и т. д.) с целью использования их для ремонтируемых лож.

Указанные методы ремонта допускаются только при применении клея «ЦНИПС-2».

При всех случаях ремонт ложи вклейками производится в такой последовательности:

– подготавливается место для вклейки;

– изготавливается вклейка;

– вклейка ставится на место и просушивается;

– вклейка обрабатывается по контуру и форме и зачищается» [3].

Жизненный путь М.Н. Плунгянской

Мария Наумовна Плунгянская родилась в июле 1900 г. в семье служащего (преподавателя) в городе Вильно, где она училась в начальной школе и гимназии. В 1915 г. их семья переехала в Москву [6].

Мария Наумовна с семнадцати лет начала трудовую деятельность, работая секретарем коллегии в Главполитпросвете, откуда ее, как перспективного молодого специалиста, увлеченного естественными науками, рекомендовали на учебу в Первый Московский государственный университет (МГУ) на химический факультет, выделив студентке госстипендию. Она во время учебы, набираясь опыта, работала практиканткой на Глуховской фабрике им. В.И. Ленина, на льняной фабрике «Заря Социализма», на газовом заводе. В течение 1925–1926 гг. с усердием готовила дипломную работу под руководством ученого-химика профессора А.М. Настюкова, разработавшего способы получения сернистых красителей.

Молодого специалиста в 1926 г. после окончания университета направили на Трехгорную мануфактуру, где она три года трудилась в научно-исследовательской лаборатории, возглавляемой профессором М.М. Чиликиным, занимавшимся химией красителей и других веществ. Мария Наумовна, набравшись опыта на производстве, в 1928 г., увлеченная исследовательской работой, устроилась химиком в Научно-исследовательский институт чистых химических реактивов (ИРЕА), а в 1929 г. перешла по распоряжению НТУ СССР в Институт древесины и древесных композиционных материалов, где проработала в течение шести лет сначала младшим, а затем старшим научным сотрудником.

В январе 1935 г. перешла на самостоятельную работу в научно-исследовательскую лабораторию (НИЛОС-Баркалеит). Наиболее результативно Мария Наумовна Плунгянская работала в лаборатории деревянных конструкций ЦНИПС по проблематике «водостойкий строительный клей», куда она перешла в январе 1937 г. Здесь за полгода исследований специалисту Плунгянской удалось выявить и проверить на практике новый рецепт клея, удовлетворявший требованиям строительной промышленности как по крепости, водостойкости и грибоустойчивости, так и по срокам схватывания и твердения.

Кандидат технических наук Мария Наумовна Плунгянская долгие годы успешно трудилась в ЦНИПС старшим научным сотрудником, была замужем, проживала в Москве на улице Малой Бронной, умерла в 1992 г., похоронена на Введенском кладбище Москвы [7].

Предложенная читателю публикация – напоминание о выдающемся изобретателе инженере-химике М.Н. Плунгянской, ее плодотворной, творческой работе, ставшей известной и получившей признание в российском научном сообществе. Талант инженера, усилия коллектива исследователей по созданию нового строительного материала принесли долгожданный положительный результат в трудное для страны время.

Выводы

В период 1930–1940 гг. в стране широко развернувшееся строительство требовало, с одной стороны, высококачественных конструктивных решений, с другой – простоты и экономичности их осуществления. В этих условиях особое значение приобретали клеевые и клефанерные конструкции, обеспечивающие индустриализацию заготовки деревянных строительных деталей и экономичность использования лесоматериалов в строительстве.

Важные свойства клея «ЦНИПС-2» – водостойкость и долговечность, а также простота и удобство обращения с ним – позволили применять материал в заводских условиях для склейки корпусов деревянных судов, клееных конструкций, деталей вагонов, нефтепроводов из шпона или тонкой фанеры, а также в боевых условиях для изготовления и ремонта стрелкового оружия и т. д., тем самым привнеся значительный экономический эффект, расширив возможности его применения в отечественной промышленности.

Результативная работа ученых института в 1930–1940 гг. имела большое практическое значение. Исследователи, получив новую рецептуру клея, предложили строительной промышленности новые типы легких индустриальных сборно-разборных конструкций высокой транспортабельности, многие достижения эффективно использовались на фронте для достижения Великой Победы.

Список литературы

1. *Бороздин М.И., Плуныанская М.Н.* Способ изготовления водостойкой и огнестойкой фанеры. Пат. СССР № 74549. Оpubл. 01.01.1949.
2. *Плуныанская М.Н.* Строительный клей ЦНИПС на основе искусственных смол. Москва, Ленинград: Госстройиздат; 1941.
3. Российский государственный архив в г. Самаре. Р-15. Оп. 1-1. Способ ремонта существующих деревянных конструкций с помощью строительного клея «ЦНИПС-2». Отчет по теме. Москва: ЦНИПС. Производ. № 3406. Л. 14.
4. Российский государственный архив экономики. Ф. 180. Оп. 1. Дело № 235 С. 84. Л. 98.
5. М-во обороны СССР. Руководство по войсковому ремонту 7,62-мм винтовки обр. 1891/30 г. и 1891 г. и карабина обр. 1938 г. Москва: Военное издательство; 1945.
6. Российский государственный архив экономики. Ф. 7297. Оп. 9. Дел № 3366. Л. 22.
7. *Артамонов М.Д.* Введенские горы. Московский некрополь. Москва: Моск. рабочий; 1993.

References

1. *Borozdin M.I., Plungyanskaya M.N.* Method of manufacture of waterproof and fire-resistant plywood. Pat. SSSR No. 74549. Publ. date 01.01.1949. (In Russian).
2. *Plungyanskaya M.N.* TSNIIPS construction glue based on artificial resins. Moscow, Leningrad: Gosstroyizdat Publ.; 1941. (In Russian).
3. The Russian State Archive in Samara. R-15. Op. 1-1. A method of repairing existing wooden structures with the help of construction glue "TSNIIPS-2". Report on the topic. Moscow: TSNIIPS. Production. No. 3406. L. 14. (In Russian).
4. Russian State Archive of Economics. F. 180. Op. 1. Case No. 235 p. 84. L. 98. (In Russian).
5. Ministry of Defense of the USSR. Manual for military repair of 7.62-mm rifles mod. 1891/30 and 1891 and carbine mod. 1938. Moscow: Voenizdat Publ.; 1945. (In Russian).
6. Russian State Archive of Economics. F. 7297. Op. 9. Cases No. 3366. L. 22. (In Russian).
7. *Artamonov M.D.* Vvedenskiye gory. Moscow Necropolis. Moscow: Moskovskii rabochii Publ.; 1993. (In Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Александр Леонидович Калиниченко, сотрудник редакционно-издательского отдела департамента научно-методической деятельности АО «НИЦ «Строительство», член Союза писателей России, заслуженный работник культуры Российской Федерации, Москва
e-mail: kalinichenkoal@cstroy.ru

Alexander L. Kalinichenko, Employee, Editorial and Publishing Sector, Department of Scientific and Methodological Activities, JSC Research Center of Construction, Member of the Union of Writers of Russia, Honored Worker of Culture of the Russian Federation, Moscow
e-mail: kalinichenkoal@cstroy.ru



АО «НИЦ «Строительство» — это более чем 95-летний опыт исследований и достижений в области строительной науки.

Мы — команда единомышленников, способных реализовать сложнейшие инженерные проекты.

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



ниц строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИИ В.А. КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИИ А.А. ПЕТУХОВА



НИИОСП
ИИ НИИ ГЕРСЛОВАНОВА



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



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**

ПРОЕКТИРОВАНИЕ

ЭКСПЛУАТАЦИЯ

ИЗЫСКАНИЯ

СТРОИТЕЛЬСТВО

Учебный центр
АО «НИЦ «Строительство»
приглашает вас:





АО «НИЦ «Строительство» проводит подготовку специалистов на курсах повышения квалификации по очной и заочной формам:

- — в области инженерных изысканий
- — в области проектирования
- — в области строительства
- — по уникальным программам АО «НИЦ «Строительство»
- — разработка индивидуальных программ обучения и учебно-тематических планов



Преподавательский состав Учебного центра

- — лекции читают академики, действующие члены и члены-корреспонденты РААСН, лауреаты Премий Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники РФ, доктора и кандидаты технических наук
- — учебный класс рассчитан на обучение до 75 человек одновременно. Оснащен системой кондиционирования и видеонаблюдения



Набор в аспирантуру и докторантуру АО «НИЦ «Строительство» проводится по направлению **08.06.01 «Техника и технология строительства»** по направлениям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»

ФОРМЫ ПОДГОТОВКИ ДИССЕРТАЦИИ В АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»



Обучение в аспирантуре,
докторантуре

Прикрепление для
подготовки диссертации без
освоения образовательных
программ



В АО «НИЦ «Строительство» работает совет по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Защита диссертаций проводится по следующим научным специальностям:

- 2.1.1** «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2** «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5** «Строительные материалы и изделия»

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ «БЕТОН И ЖЕЛЕЗОБЕТОН»

Журнал «Бетон и железобетон» – научно-техническое рецензируемое издание для профессионалов-строителей, архитекторов, инженеров, проектировщиков, всех работников строительного комплекса, а также для индивидуальных застройщиков. Издается с 1955 г. В журнале публикуются материалы о новых конструктивных и планировочных решениях, прогрессивных строительных материалах, о теплосберегающих технологиях и конструкциях, об экономике жилищно-гражданского строительства, проблемах архитектуры, градостроительства, сельского строительства, экологии жилища.

Журнал публикует подробные тематические исследования, обзорные статьи, информирующие об открытиях и новациях в мире бетонных технологий.

Учредитель: Ассоциация «Железобетон».

Издатель: АО «НИЦ «Строительство».

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор). Свидетельство о регистрации печатного издания ПИ № ФС 77-76959 от 09.10.2019

Журнал зарегистрирован в Национальном центре ISSN (International Standard Serial Number): печатное – 0005-9889.

Журнал издается на платформе Elpub Национального консорциума российских библиотек (НЭИКОН). Входит в систему РИНЦ (Российский индекс научного цитирования) на платформе eLIBRARY.ru.

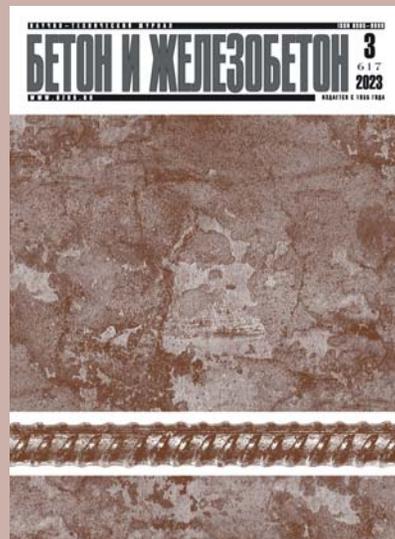
Основан: Институт НИИЖБ Госстроя СССР и ВНИИжелезобетон Минстройматериалов СССР.

Тираж печатного издания – 300 экземпляров.

Периодическое печатное издание (6 раз в год).

Подробная информация на сайте **bzhb.ru**

Подписной индекс ООО «АРЗИ» – **85502**.



*Приглашаем к сотрудничеству
ученых, аспирантов,
исследователей!*

Адрес редакции: г. Москва, 2-я Институтская,
дом 6, корпус 1, кабинет 115

Тел. редакции: +7(495)602-00-70 доб. 1022, 1023

Выпускающий редактор – Починина Наталья

e-mail: pochininane@stroy.ru





МИНСТРОЙ
РОССИИ



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИМ. БА. КУРСЧЕВО



НИИЖБ
ИМ. АА. ГРЕБЕНЕВА



НИИОСП
ИМ. ИМ. ГОТССЕВ-КОБА

II МЕЖДУНАРОДНЫЙ СТРОИТЕЛЬНЫЙ КОНГРЕСС

Наука и инновации

forum-cstroy.ru



Москва
2025

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»
Вып. 1(40) 2024

Редактор выпуска Починина Н.Е.
Компьютерная верстка Чорненький С.И.

Дата выхода в свет: 25.03.2024 г. Формат 70×100/16
Бумага мелованная. Офсетная печать.
Тираж 500 экз. Заказ № 50155

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Триада»
170034, Российская Федерация,
г. Тверь, пр. Чайковского, д. 9, оф. 514.
тел.: +7 910 647-49-85
e-mail: triadatver@yandex.ru
Свободная цена



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ISSN: 2224-9494 (Print)

ISSN: 2782-3938 (Online)

Подписной индекс: 36569

АО «НИЦ «Строительство»

Москва, 2024