



**НИЦ строительство**  
научно-исследовательский центр

# ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 3(42) 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](mailto: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. 3(42) 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](mailto:vestnikstroy@list.ru)

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



**Главный редактор****ЗВЕЗДОВ Андрей Иванович**, д-р техн. наук, профессор**Научный редактор****СМИРНОВА Любовь Николаевна**, канд. техн. наук**БАЖЕНОВ Валентин Георгиевич**, академик АИН,

д-р физ.-мат. наук, профессор

НИИМ ННГУ им. Лобачевского,

Нижний Новгород, Российская Федерация

**VAL Dimitri V., Dr., Professor**

School of the Built Environment, Edinburgh, UK

**ВОЛКОВ Андрей Анатольевич**,

д-р техн. наук, профессор

АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**ВЕДЯКОВ Иван Иванович**, д-р техн. наук, профессор ЦНИИСК

им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**ГУСЕВ Борис Владимирович**, д-р техн. наук, профессор,

президент Российской инженерной академии (РИА),

президент Международной инженерной академии (МИА),

член-корреспондент РАН,

Москва, Российская Федерация

**ДАВИДЮК Алексей Николаевич**, д-р техн. наук

ГК «КТБ», Москва, Российская Федерация

**КОЛЫБИН Игорь Вячеславович**, канд. техн. наук

НИИОСП им. Н.М. Герсманова

АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**КОНДРАТЬЕВА Лидия Никитовна**,

д-р техн. наук, профессор

СПбГАСУ, Санкт-Петербург, Российская Федерация

**КУЗЕВАНОВ Дмитрий Владимирович**, канд. техн. наук

НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**КУРБАЦКИЙ Евгений Николаевич**,

д-р техн. наук, профессор

РУТ МИИТ, Москва, Российская Федерация

**LYAMIN Andrei, Dr., Professor**

School of Engineering, Callaghan, Australia

**МАИЛАН Дмитрий Рафаэлович**, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Донской государственный технический

университет»,

Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**МАНГУШЕВ Рашид Абдуллович**,

д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент Российской

академии архитектуры и строительных наук (РААСН) ГОУ ВПО

«СПбГАСУ»,

Санкт-Петербург, Российская Федерация

**МИРСАЯПОВ Илизар Талгатович**, д-р техн. наук, профессор,

член-корреспондент Российской академии архитектуры и

строительных наук (РААСН) ФГБОУ ВО «КазГАСУ»,

Казань, Российская Федерация

**МОНДРУС Владимир Львович**, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»,

Москва, Российская Федерация

**МОХОВ Андрей Игоревич**, д-р техн. наук, профессор,

академик Российской академии естественных наук (РАЕН)

Некоммерческое партнерство «Энергоэффект»,

Москва, Российская Федерация

**НЕМЧИНОВ Юрий Иванович**,

академик АИН, АСУ, д-р техн. наук, профессор

ГП НИИСК, Киев, Украина

**НЕСВЕТАЕВ Григорий Васильевич**, д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «Донской государственный

технический университет»,

Ростов-на-Дону, Российская Федерация

**ОБОЗОВ Владимир Иванович**, д-р техн. наук, профессор

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**PUZRIN Alexander, Dr., Professor**

Institute for Geotechnical Engineering,

Zurich, Switzerland

**ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ Константин Пантелеевич**,

д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Москва, Российская Федерация

**ТАМРАЗЯН Ашот Георгиевич**,

д-р техн. наук, профессор

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Москва, Российская Федерация

**ТЕР-МАТИРОСЯН Армен Заенович**, д-р техн. наук

ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», Москва, Российская Федерация

**ТРАВУШ Владимир Ильич**, вице-президент РААСН,

д-р техн. наук, профессор

ЗАО «Горпроект», Москва, Российская Федерация

**ФАРФЕЛЬ Михаил Иосифович**, канд. техн. наук

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**ФЕДЮК Роман Сергеевич**, д-р техн. наук, доцент

Дальневосточный федеральный университет, Владивосток,

Российская Федерация

**ХАЧИЯН Эдуард Ефремович**, академик НАН РА,

д-р техн. наук, профессор

Национальный университет архитектуры

и строительства Армении, Ереван, Республика Армения

**ЧЕЛЫШКОВ Павел Дмитриевич**, д-р техн. наук, доцент

АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**ШУЛЯТЪЕВ Олег Александрович**, д-р техн. наук, профессор

НИИОСП им. Н.М. Герсманова

АО «НИЦ «Строительство»,

Москва, Российская Федерация

**Вестник НИЦ «Строительство»****Научный потенциал строительной отрасли**

Вып. 3(42) / под ред. А.И. Звездова. –

М.: АО «НИЦ «Строительство», 2024. – 158 с.

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

DOI журнала: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>DOI выпуска: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42))**В действующем Перечне ВАК от 01.10.2024 г. под номером 615.**

Зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий

и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

ПИ № ФС77-75188 от 22 февраля 2019 г.

Свидетельство о регистрации средства массовой информации

Эл № ФС77-82129 от 18 октября 2021 г.

Содержит статьи, посвященные актуальным проблемам

и перспективам строительной науки, непосредственно

связанным с решением практических задач.

Для научных работников, инженеров-проектировщиков,

преподавателей, аспирантов.

ISSN 2224-9494 (Print)

ISSN 2782-3938 (Online)

© АО «НИЦ «Строительство»,

«Вестник НИЦ «Строительство», 2024

## EDITORIAL BOARD

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

### Editor in Chief

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

### Scientific Editor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

### Bulletin of Science and Research Center of Construction Scientific potential of the construction industry

Issue 3(42) / edited by A.I. Zvezdov. – M.: JSC Research Center of Construction, 2024. – 158 p. ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online) DOI journal <https://doi.org/10.37538/2224-9494> DOI issue [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42))

**In the current version of List of HAC from October 1, 2024 our journal has a number 615.**

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

### **Зенин С.А.**

Некоторые вопросы расчета прочности нормальных сечений внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой ..... 7

## Строительные материалы и изделия

### **Залилов И.В., Арискин М.В., Мартышкин Д.О.**

Аддитивные технологии для повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб соединений деревянных конструкций ..... 16

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

Оценка эффективности огнезащитных покрытий в процессе ускоренного климатического старения ..... 28

### **Розенталь Н.К., Чехний Г.В.**

Защита железобетонных конструкций в биологически агрессивных средах ..... 47

## Основания и фундаменты, подземные сооружения

### **Алексеев А.Г.**

Расчет глубины сезонного промерзания грунтов инженерными и численными методами... 56

## Статьи по материалам I конференции по каменным конструкциям «Онищиковские чтения»

### **Ищук М.К.**

Проблемные вопросы в развитии норм по каменным конструкциям ..... 83

### **Пономарев О.И., Мухин М.А., Чигрина О.С., Дозорова А.Ю., Смирнов С.И.**

Прочность кладки из керамического шлифованного и нешлифованного кирпича (сравнение российских и европейских норм) ..... 95

### **Ищук Е.М., Ищук М.К.**

Усиление кирпичной кладки инъекцией метилметакрилата ..... 111

### **Пономарев О.И., Мухин М.А., Чигрина О.С., Дозорова А.Ю., Логвинов А.В.**

Напряженно-деформированное состояние кладки с применением крупноформатных керамических камней при действии сосредоточенных нагрузок ..... 124

### **Титаев В.А., Черный И.А., Соколов Б.С., Титаев Д.В.**

К вопросу о коэффициенте термической деформации влажной каменной кладки при отрицательных температурах ..... 139

### **Титаев В.А., Черный И.А., Титаев Д.В.**

Длина температурного блока замораживаемой влажной облицовочной кладки ..... 148

# Contents

## Building constructions, buildings and structures

### **Zenin S.A.**

A refined method for designing the strength of normal cross-sections of eccentrically compressed concrete elements with composite polymer reinforcement ..... 7

## Building materials and products

### **Zalilov I.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O.**

Additive technologies for improving the strength and deformation characteristics of plastic washer joints of wooden structures ..... 16

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

Efficiency assessment of flame retardant coatings in the process of accelerated climatic aging..... 28

### **Rozental N.K., Chekhonii G.V.**

Protection of reinforced concrete structures in biologically aggressive environments..... 47

## Foundations, underground structures

### **Alekseev A.G.**

Calculation of seasonal soil freezing depth by engineering and numerical methods ..... 56

## Articles on the materials of the 1st Conference on Masonry Structures “Onishchikovskie Chtenija”

### **Ishchuk M.K.**

Problematic issues in the development of norms for masonry structures..... 83

### **Ponomarev O.I., Mukhin M.A., Chigrina O.S., Dozorova A.Yu., Smirnov S.I.**

Strength of masonry made of ceramic brick with ground and unground surfaces (comparison of Russian and European norms)..... 95

### **Ishchuk E.M., Ishchuk M.K.**

Brick masonry reinforcement with methyl methacrylate injection ..... 111

### **Ponomarev O.I., Mukhin M.A., Chigrina O.S., Dorozova A.Yu., Logvinov A.V.**

Stress-strain state of masonry with large ceramic blocks under concentrated loads ..... 124

### **Titaev V.A., Cherny I.A., Sokolov B.S., Titaev D.V.**

On the coefficient of linear thermal expansion of wet masonry at freezing temperatures ..... 139

### **Titaev V.A., Cherny I.A., Titaev D.V.**

The temperature block length for the wet facing masonry under freezing ..... 148

УДК 624.075.23

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-7-15](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-7-15)

EDN: XGAJUO

# НЕКОТОРЫЕ ВОПРОСЫ РАСЧЕТА ПРОЧНОСТИ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ВНЕЦЕНТРЕННО СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, АРМИРОВАННЫХ КОМПОЗИТНОЙ ПОЛИМЕРНОЙ АРМАТУРОЙ

С.А. ЗЕНИН, канд. техн. наук

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

## Аннотация

*Введение.* В действующих отечественных нормах по проектированию конструкций из бетона, армированных композитной арматурой – СП 295.1325800.2017, не учитывается работа сжатой арматуры при расчете внецентренно сжатых элементов. В рамках проведенных ранее исследований была предложена методика расчета прочности нормальных сечений внецентренно сжатых элементов, которая показала достаточно хорошую сходимость с опытными данными, однако она также показывала некоторую недооценку несущей способности таких элементов. В настоящей работе выполнен дальнейший анализ разработанной методики и сформулированы предложения по ее уточнению с целью выявления дополнительных резервов прочности бетонных элементов, армированных композитной арматурой.

*Цель.* Уточнение методики расчета прочности нормальных сечений внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой, сравнительный анализ уточненной методики расчета с опытными и теоретическими данными и оценка ее надежности.

*Материалы и методы.* Теоретические исследования проведены на основе анализа результатов проведенных автором испытаний опытных бетонных образцов, армированных композитной арматурой, на действие внецентренно приложенной статической сжимающей нагрузки, состоящей из четырех серий образцов с общим количеством 12 образцов.

*Результаты.* Сформулированы предложения по уточнению значения высоты сжатой зоны, а также величины растягивающих напряжений в композитной арматуре в методике расчета прочности нормальных сечений внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой.

*Выводы.* На основе анализа опытных данных предложена уточненная методика расчета прочности нормальных сечений внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой. Также выполнена оценка предложенной уточненной методики, которая показала, что она обладает необходимым уровнем надежности, при этом обеспечивает наилучшую сходимость с опытными данными.

**Ключевые слова:** внецентренно сжатые элементы, бетон, композитная полимерная арматура, прочность, расчет, надежность

**Для цитирования:** Зенин С.А. Некоторые вопросы расчета прочности нормальных сечений внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной полимерной арматурой. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):7–15. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-7-15](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-7-15)

## Вклад автора

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

## Финансирование

Исследование выполнено в рамках конкурсного финансирования АО «НИЦ «Строительство».

### Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.07.2024

Поступила после рецензирования 15.08.2024

Принята к публикации 22.08.2024

## A REFINED METHOD FOR DESIGNING THE STRENGTH OF NORMAL CROSS-SECTIONS OF ECCENTRICALLY COMPRESSED CONCRETE ELEMENTS WITH COMPOSITE POLYMER REINFORCEMENT

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

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

### Abstract

*Introduction.* The operating standards for the design of concrete structures with composite reinforcement SP 295.1325800.2017 do not consider the work of compressed reinforcement when calculating eccentrically compressed elements. The previous studies proposed a method for calculating the strength of normal cross-sections of eccentrically compressed elements. Though this method has shown a reasonably high agreement with the experimental data, it has also indicated some underestimation of the load-bearing capacity of such elements. In this paper, a further analysis of the developed method is performed and suggestions for its refinement are formulated in order to identify additional reserves of strength of concrete elements reinforced with composite reinforcement.

*Aim.* To refine the method for designing the strength of normal cross-sections of eccentrically compressed concrete elements with composite reinforcement, to compare the refined method with experimental and theoretical data, as well as to assess its reliability.

*Materials and methods.* Theoretical studies are based on the results of the tests that included the experimental examination of concrete samples reinforced with composite reinforcement under the action of eccentrically applied static compressive load consisting of four series of specimens with a total of 12 specimens.

*Results.* The suggestions were formulated for specifying the value of the height of the compressed zone, as well as the value of tensile stresses in composite reinforcement for designing the strength of normal cross-sections of eccentrically compressed concrete elements with composite reinforcement.

*Conclusions.* Based on the analysis of experimental data, a refined methodology for designing the strength of normal cross-sections of eccentrically compressed concrete elements reinforced with composite reinforcement is proposed. In addition, the assessment of the proposed refined method is carried out, which proved to have the required level of reliability, while providing the best convergence with the experimental data.

**Keywords:** eccentrically compressed elements, concrete, composite polymer reinforcement, strength, design, durability

**For citation:** Zenin S.A. A refined method for designing the strength of normal cross-sections of eccentrically compressed concrete elements with composite polymer reinforcement. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):7–15. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-7-15](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-7-15)

### Author contribution statement

The author takes responsibility for all aspects of the paper.

**Funding**

The study was carried out within the framework of competitive financing of JSC Research Center of Construction.

**Conflict of interest**

The author declares no conflict of interest.

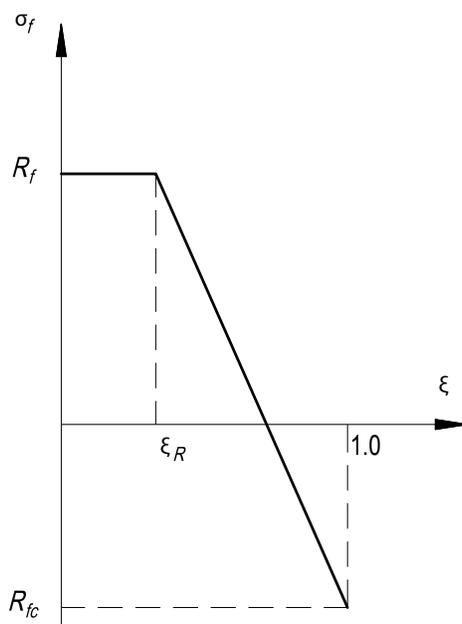
Received 30.07.2024

Revised 15.08.2024

Accepted 22.08.2024

Принятая в действующем СП 295.1325800.2017 [1] методика расчета прочности сжатых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой (далее – АКП) использует эмпирические зависимости, основанные на результатах экспериментальных исследований, имеющих к 2017 году. При этом в связи с ограниченным объемом выполненных экспериментов зависимости для расчетов были приняты с осторожностью, что обеспечивает некоторый запас несущей способности сжатых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой. Данное обстоятельство приводит к перерасходу композитной арматуры в таких элементах.

Ранее был опубликован ряд работ [2, 3], в которых также была освещена проблема недооценки несущей способности внецентренно сжатых элементов и были сформулированы предложения по внесению изменений в методику норм. В частности, в работе [3] была предложена зависимость для определения высоты сжатой зоны внецентренно сжатого бетонного элемента, армированного композитной арматурой, с учетом работы композитной полимерной арматуры в сжатой зоне бетона при расчете прочности методом предельных усилий. Одним из основных факторов, влияющих на расчетную оценку прочности нормального сечения внецентренно сжатого элемента, является высота сжатой зоны  $x$ , значение которой зависит от уровня напряжений в растянутой арматуре в предельном состоянии по прочности. Наиболее удобным инструментом оценки в этом случае является использование относительной высоты сжатой зоны нормального сечения  $\xi = x/h_0$ , где  $h_0$  – рабочая высота сечения. В качестве базовой зависимости относительной высоты сжатой зоны от напряжений в арматуре  $\sigma_f$  была принята линейная зависимость в пределах от ее граничного значения  $\xi_R$  до единицы (рис. 1).



**Рис. 1.** Расчетная зависимость напряжений в арматуре от относительной высоты сжатой зоны сечения внецентренно сжатого элемента

**Fig. 1.** Design dependence of stresses in the reinforcement on the relative height of the compressed zone of the section of an eccentrically compressed element

С учетом принятого подхода линейная зависимость напряжений в арматуре  $\sigma_f$  от относительной высоты сжатой зоны принята в виде

$$\sigma_f = R_f - \frac{\xi - \xi_R}{1 - \xi_R} \times (R_f + R_{fc}), \tag{1}$$

где  $R_f$  – расчетное сопротивление растяжению композитной арматуры;

$R_{fc}$  – расчетное сопротивление сжатию композитной арматуры.

Граничную высоту сжатой зоны  $\xi_R$  определяют в соответствии с положениями норм [1] по формуле

$$\xi_R = \frac{x_R}{h_0} = \frac{\omega}{1 + \frac{\varepsilon_f}{\varepsilon_{b2}}}, \tag{2}$$

где  $\omega$  – характеристика сжатой зоны бетона, принимаемая для тяжелого бетона классов до В60 включительно равной 0,8, а для тяжелого бетона классов В70–В100 и для мелкозернистого бетона – равной 0,7;

$\varepsilon_f$  – расчетное значение предельных относительных деформаций композитной полимерной арматуры, принимаемое равным  $\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f}$ ;

$\varepsilon_{b2}$  – относительные деформации сжатого бетона при напряжениях  $R_b$ , принимаемые по СП 63.13330.2018 [4].

Если в предельном по прочности состоянии напряжения в растянутой арматуре  $\sigma_f$  достигают ее сопротивления осевому растяжению  $R_f$ , то высоту сжатой зоны  $x$  определяют из условия равновесия внешних и внутренних продольных сил в сечении:

$$N - R_b \times A_b - R_{fc} \times A'_f + R_f \times A_f = 0. \tag{3}$$

Если напряжения в композитной арматуре не достигают своих предельных значений при растяжении  $R_f$ , то выражение (3) записывают в виде

$$N - R_b \times A_b - R_{fc} \times A'_f + \sigma_f \times A_f = 0. \tag{4}$$

Из совместного решения уравнений (1) и (4) значение высоты сжатой зоны для случая, когда  $\xi > \xi_R$ , будет определяться по формуле

$$x = \frac{N + A_f \times \frac{R_f + R_{fc} \times \xi_R}{1 - \xi_R} - R_{fc} \times A'_f}{R_b \times b + \frac{(R_f + R_{fc}) \times A_f}{h_0 \times (1 - \xi_R)}}. \tag{5}$$

В работе [2] также отмечено, что в случае расчета элемента без учета сжатой арматуры в формуле (5) достаточно принять  $A'_f = 0$  и  $R_{fc} = 0$ . Получаемая зависимость будет отличаться от принятой в [1]:

$$x = \frac{N + \frac{R_f \times A_f}{1 - \xi_R}}{R_b \times b + \frac{R_f \times A_f}{h_0 \times (1 - \xi_R)}}. \tag{6}$$

Можно отметить, что для базовой линейной зависимости относительной высоты сжатой зоны  $\xi$  от напряжений в арматуре  $\sigma_f$  правая граница была принята равной единице (рис. 1). Для случая центрального сжатия, при котором высота сжатой зоны равна высоте сечения, правая граница будет несколько больше, и ее так же, как и в принятых расчетах железобетонных конструкций, можно принять равной  $\xi = \frac{x}{h_0} = \frac{h}{0,9h} = 1,1$ . В этом случае диаграмма, приведенная на рис. 1, примет вид, изображенный на рис. 2.

При учете предлагаемого уточнения напряжения в растянутой арматуре будут определяться по формуле

$$\sigma_f = \frac{1,1 \times R_f + R_{fc} \times \xi_R - \xi \times (R_f + R_{fc})}{1,1 - \xi_R}. \quad (7)$$

Решая совместно уравнения (3) и (7), получим уточненную зависимость для определения высоты сжатой зоны

$$x = \frac{N + A_f \times \frac{1,1 \times R_f + R_{fc} \times \xi_R}{1,1 - \xi_R} - R_{fc} \times A'_f}{R_b \times b + \frac{(R_f + R_{fc}) \times A_f}{h_0 \times (1,1 - \xi_R)}}. \quad (8)$$

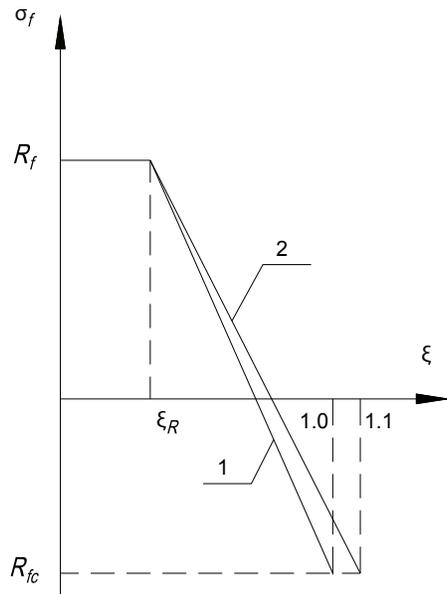
Без учета работы сжатой арматуры зависимость (8) приобретает вид

$$x = \frac{N + \frac{1,1 \times R_f \times A_f}{1,1 - \xi_R}}{R_b \times b + \frac{R_f \times A_f}{h_0 \times (1,1 - \xi_R)}}. \quad (9)$$

Верификация предлагаемой методики была выполнена на примере опытных внецентренно сжатых образцов из бетона, армированных композитной полимерной арматурой, испытания которых при различных эксцентриситетах приложения сжимающей нагрузки были проведены в 2024 году в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство». Детальное описание опытных образцов приведено в работе [5].

По результатам выполненных экспериментальных исследований было установлено, что опытные значения разрушающих нагрузок для опытных образцов на 15–30% превышают расчетные значения, вычисленные по методике действующего СП 295.1325800.2017 [1]. Это в целом подтверждает факт наличия определенных запасов в методике расчета норм.

Для полноты оценки были рассмотрены различные методики расчета прочности нормальных сечений с определением высоты сжатой зоны  $x$  по зависимостям действующих



1 – по работе [2]; 2 – предлагаемая корректировка  
**Рис. 2.** Расчетная зависимость напряжений в арматуре от относительной высоты сжатой зоны сечения внецентренно сжатого элемента с учетом предлагаемой корректировки

1 – according to [2]; 2 – proposed refinement  
**Fig. 2.** Design dependence of stresses in the reinforcement on the relative height of the compressed zone of the section of an eccentrically compressed element taking into account the proposed refinement

Таблица 1

**Результаты сравнительного анализа методик расчетов**

Table 1

**Comparative analysis of calculation methods**

Образец	$N_{он}$	$N_{сп}$	$N_{(6)}$	$N_{(9)}$	$N_{(5)}$	$N_{(8)}$	$N_{он}/N_{сп}$	$N_{он}/N_{(6)}$	$N_{он}/N_{(9)}$	$N_{он}/N_{(5)}$	$N_{он}/N_{(8)}$
1	592,4	494,58	542,44	544,93	558,09	560,8	1,20	1,09	1,09	1,06	1,06
2	584,4	508,79	547,8	550,07	559,46	561,84	1,15	1,07	1,06	1,04	1,04
3	581,1	499,36	538,25	540,54	549,79	552,19	1,16	1,08	1,08	1,06	1,05
4	370,4	315,91	363,36	368,14	369,41	374,33	1,17	1,02	1,01	1,00	0,99
5	381,1	317,89	365,62	370,41	371,87	376,79	1,20	1,04	1,03	1,02	1,01
6	401,1	314,08	361,53	366,31	367,73	372,62	1,28	1,11	1,09	1,09	1,08
7	581,1	497,6	536,6	538,91	548,07	550,49	1,17	1,08	1,08	1,06	1,06
8	581,1	497,6	536,6	538,9	548,07	550,49	1,17	1,08	1,08	1,06	1,06
9	561,1	499,36	538,25	540,54	549,79	552,19	1,12	1,04	1,04	1,02	1,02
10	381,1	317,71	365,48	370,1	371,35	376,31	1,20	1,04	1,03	1,03	1,01
11	381,1	314,08	361,53	366,31	367,73	372,63	1,21	1,05	1,04	1,04	1,02
12	373,1	314,11	361,37	366,16	367,48	372,38	1,19	1,03	1,02	1,02	1,00

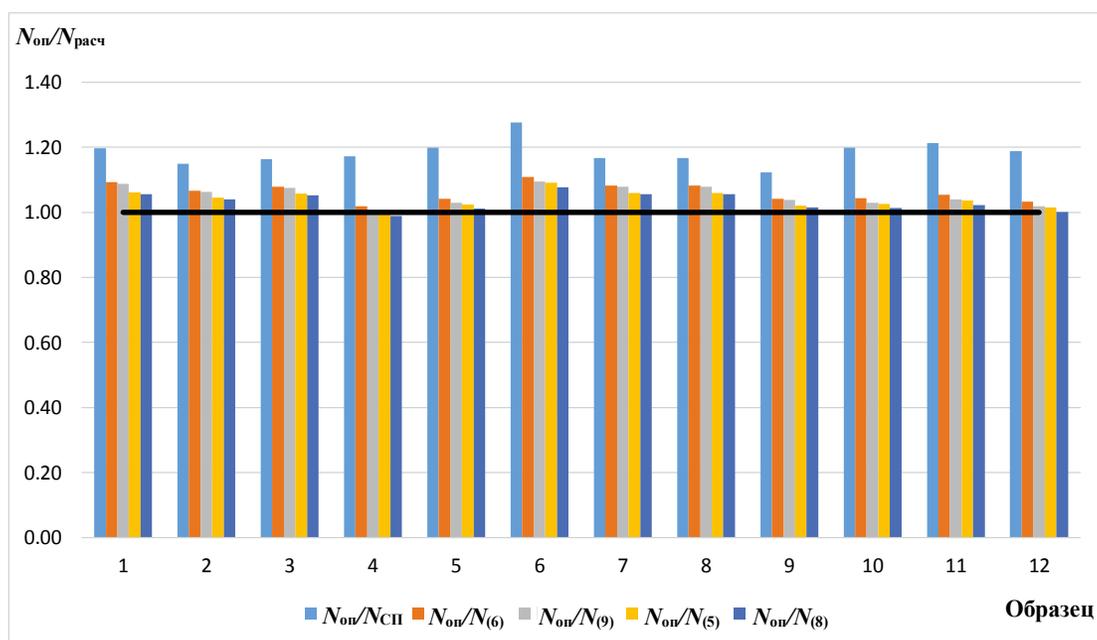
Примечание:  $N_{он}$  – опытная разрушающая нагрузка, кН;  $N_{сп}$  – расчетная нагрузка, определенная по методике действующего СП 295.1325800.2017 [1];  $N_{(6)}$  – расчетная нагрузка, определенная с учетом зависимости (6) по работе [2];  $N_{(9)}$  – расчетная нагрузка, определенная с учетом предлагаемой зависимости (9);  $N_{(5)}$  – расчетная нагрузка, определенная с учетом зависимости (5) по работе [2];  $N_{(8)}$  – расчетная нагрузка, определенная с учетом предлагаемой зависимости (8).

Note:  $N_{оп}$  – experimental destructive load, kN;  $N_{сп}$  is the calculated load determined according to the methodology of the current SP 295.1325800.2017 [1];  $N_{(6)}$  is the calculated load, determined taking into account the dependence (6) on the work [2];  $N_{(9)}$  is the calculated load, determined taking into account the proposed dependence (9);  $N_{(5)}$  is the calculated load, determined taking into account the dependence (5) on the work [2];  $N_{(8)}$  is the calculated load, determined taking into account the proposed dependence (8).

норм – СП 295.1325800.2017 [1], по уточненной зависимости (6), приведенной в работе [2], и по предложенной зависимости (9), а также с учетом сжатой арматуры по зависимости (5) и уточненной зависимости (8). В табл. 1 приведены результаты сравнительного анализа фактической разрушающей нагрузки испытанных опытных образцов [5] с расчетной прочностью по перечисленным выше методикам.

Оценка несущей способности с учетом влияния сжатой арматуры выполнялась из условия ограничения деформаций сжатой арматуры, обеспечивающего совместность работы бетона и арматуры, предельными деформациями укорочения сжатого бетона. С этой целью напряжения в сжатой арматуре определялись по предельным деформациям сжатого бетона, принятых равными 0,002, при фактическом модуле упругости композитной арматуры при сжатии. При этом влияние степени насыщения элемента поперечной арматурой на возможность увеличения относительных деформаций при сжатии, как предложено в работе [6], не учитывалось.

Как видно из табл. 1, методика расчета действующих норм СП 295.1325800.2017 [1] показывает достаточно осторожные результаты – расчетная нагрузка выше опытной в среднем на 18%. Учет влияния сжатой арматуры при определении высоты сжатой зоны нормального сечения с применением методик работы [2] по зависимостям (5) и (6) показывает лучшее схождение с опытными данными – в среднем расхождение составляет 4 и 6% соответственно.



**Рис. 3.** Сравнение расчетных значений нагрузок, определенных по методикам СП [1], работы [2] и предлагаемой методике, с опытными значениями

**Fig. 3.** Comparison of design values of loads determined by the methods of SP [1], paper [2], and the proposed methodology with the experimental values

При этом предложенные методики с уточнением высоты сжатой зоны – зависимости (8) и (9) — показали наименьшее расхождение с опытными данными – 3 и 5% соответственно.

Для наглядности результаты сравнительного анализа приведены на рис. 3.

Дополнительно была проведена оценка надежности методик определения прочности нормального сечения внецентренно сжатых элементов из бетона, армированного композитной арматурой при относительной высоте сжатой зоны больше граничной при определении высоты сжатой зоны по указаниям действующего свода правил, работы [2], а также предлагаемых зависимостей (8) и (9). Оценка надежности выполнялась для соотношения опытного и расчетного значения разрушающих нагрузок, определяемого при высоте сжатой зоны по различным методикам. Результаты оценки надежности методик приведены в табл. 2.

Как видно из табл. 2, наименьшее среднее значение соотношения опытных значений разрушающих нагрузок к расчетным, характеризующее лучшую сходимость с опытными данными, имеет предлагаемая зависимость (8). Это несущественно, но несколько ниже, чем для зависимости (5) по работе [2], учитывающей содержание сжатой арматуры в сечении. Принимая содержание сжатой арматуры при определении высоты сжатой зоны равным нулю (упрощенная методика), незначительно ухудшается сходимость с опытными данными как для зависимости (6) работы [2], так и для предлагаемой зависимости (9). В данном случае расхождение составляет всего 2% в осторожность, что для практического применения упрощенных методик можно считать приемлемым.

Отдельно следует обратить внимание на параметр минимального значения. С точки зрения обеспечения необходимой надежности методики данный параметр не должен быть

Таблица 2

**Оценка надежности методик расчетов**

Table 2

**Reliability assessment of design methods**

Показатель	Определение высоты сжатой зоны $x$				
	По (1)	По (6)	По (9)	По (5)	По (8)
Среднее значение $N_{оп}/N_{расч}$	1,18	1,06	1,05	1,04	1,03
Среднее квадратическое отклонение	0,038	0,027	0,030	0,025	0,027
Коэффициент вариации	0,032	0,026	0,028	0,024	0,026
Минимальное значение	1,12	1,02	1,01	1,00	0,99
Обеспеченность 0,95	1,12	1,02	1,00	1,00	0,99
Количество результатов	12	12	12	12	12
Количество результатов $N_{оп}/N_{расч} < 1,0$	0	0	0	0	1
Количество результатов $N_{оп}/N_{расч} < 1,0$ (%)	0,0	0,0	0,0	0,0	8,3

ниже обратного значения коэффициента надежности, т. е. ниже единицы. Для всех методик это условие соблюдается, за исключением предлагаемой методики (8), для которой минимальное значение соотношения составляет 0,99, что практически соответствует единице.

Также все методики имеют достаточную обеспеченность 0,95 при достаточно высоком значении коэффициента вариации. Все методики показывают обеспеченность не ниже 1 либо равную или близкую к ней.

Кроме того, все методики расчета, за исключением предложенной зависимости (8), не имеют значений соотношений, меньших единицы. Для предлагаемой методики (8) имеется одно значение соотношения опытной разрушающей нагрузки к расчетной, равное 0,99. При общем числе опытных образцов это составляет 8,3% от общего числа, что выше приемлемого значения в 5%. Это обуславливает необходимость проведения дальнейшей верификации методики на большей выборке опытных образцов.

**Выводы**

По общим результатам проведенной оценки видно, что в целом все методики обладают необходимым уровнем надежности, при этом отдельные из них, в частности использующие предлагаемые зависимости (8) и (9), обеспечивают наилучшую сходимость с опытными данными.

Безусловно, данная оценка надежности проведена на незначительном количестве опытных данных, т. е. на ограниченной выборке, и требует большего количества опытных образцов для анализа. При этом более лучшая сходимость предлагаемых методик с опытными данными обеспечивает наиболее оптимальные конструктивные решения при сохранении необходимого уровня надежности.

## Список литературы

1. СП 295.1325800.2017. Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2017.
2. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Расчет прочности внецентренно сжатых бетонных элементов с композитной полимерной арматурой. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;33(2):150–160. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-150-160](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160)
3. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Расчет прочности внецентренно сжатых элементов с учетом работы композитной полимерной арматуры. Строительная механика и расчет сооружений. 2022;(4):29–35. <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.4.29.35>
4. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Москва: Минстрой России; 2018.
5. Мухамедиев Т.А., Зенин С.А., Кудяков К.Л. Исследование прочности внецентренно сжатых бетонных элементов, армированных композитной арматурой. Бетон и железобетон. 2024;621(2):13–19. [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2\(621\)-13-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2(621)-13-19)
6. Мухамедиев Т.А., Майоров С.А. Учет работы сжатой композитной полимерной арматуры при расчете прочности сжатых элементов методом предельных усилий. В: Соломинские чтения: материалы первой Междунар. науч. конф. (8–9 нояб. 2022 г.). Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ; 2022, с. 106–109.

## References

1. SP 295.1325800.2017. Concrete structures reinforced with fibre-reinforced polymer bars. Design rules. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).
2. Mukhamediev T.A., Maiorov S.A. Strength calculation of eccentrically compressed concrete elements with a composite polymer reinforcement. Vestnik NIC Stroitel`stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;33(2):150–160. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2\(33\)-150-160](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-150-160)
3. Mukhamediev T.A., Maiorov S.A. Strength calculation of eccentrically compressed elements taking into account the operation of compressed fiber reinforced polymer bars. Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2022;(4):29–35. (In Russian). <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.4.29.35>
4. SP 63.13330.2018. Concrete and reinforced concrete structures. General provisions. Moscow: Gosstandart of Russia; 2018. (In Russian).
5. Mukhamediev T.A., Zenin S.A., Kudyakov K.L. Research of strength of uniaxial compressed concrete elements reinforced with FRP. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2024;621(2):13–19. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2\(621\)-13-19](https://doi.org/10.37538/0005-9889-2024-2(621)-13-19)
6. Mukhamediev T.A., Maiorov S.A. Accounting for the operation of compressed composite polymer reinforcement when calculating the strength of compressed elements by the method of marginal forces. In: Solomin readings: proceedings of the first International Scientific Conference, November 8–9, 2022. Chelyabinsk: SUSU Publishing Center; 2022, pp. 106–109. (In Russian).

## Информация об авторе / Information about the author

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

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

УДК 624.011.2

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-16-27](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-16-27)

EDN: ZYDRJF

# АДДИТИВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ И ДЕФОРМАТИВНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИКОВЫХ ШАЙБ СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

И.В. ЗАЛИЛОВ✉

М.В. АРИСКИН, канд. техн. наук

Д.О. МАРТЫШКИН

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

## Аннотация

*Введение.* Соединения элементов современных деревянных конструкций в значительной степени включают в себя использование механических рабочих связей. Повышение надежности узловых соединений в современных деревянных конструкциях достигается за счет применения различного рода вкладышей, которые впрессовываются, вкладываются или клеиваются в древесину соединяемых элементов и тем самым обеспечивают передачу усилий от одного элемента к другому. Соединения на клеиваемых шайбах позволяют на относительно малой площади взаимного контакта передать значительные усилия, что обусловлено их большой несущей способностью. Вклеивание стальных шайб в местах повышенной концентрации напряжений при передаче усилий позволяет значительно перераспределить напряжения смятия/скалывания на большую площадь соединяемых деталей. Обладая достаточно высокой несущей способностью, стальные шайбы имеют существенный недостаток, а именно – высокую степень коррозии, что вызывает необходимость проведения дополнительных работ по защите металлических деталей от коррозии или замены материала на композитный. На основе результатов натурных испытаний образцов с применением клеенных пластиковых шайб рассмотрены варианты повышения прочностных и деформативных характеристик материала пластиковых шайб путем применения аддитивных технологий.

*Цель.* Повышение несущей способности соединения деревянных конструкций посредством повышения прочностных и деформативных характеристик материала клеенных шайб.

*Материалы и методы.* Представлена методика проведения натурных испытаний деревянных образцов с клеенными стеклопластиковыми шайбами. Деревянные элементы выполняются из сосны второго сорта, шайбы – из пластиков REC Formax и REC Friction. Испытание производилось на сжатие вдоль волокон, с контролем вертикальных деформаций сдвига. Рассмотрены методы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб путем применения аддитивных технологий.

*Результаты.* На основе данных натурных испытаний построены графики деформаций образцов на клеенных пластиковых шайбах, выполнен анализ полученных результатов. Установлена достаточно высокая пластичность материалов шайб. Предложены способы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб. Предложен рациональный вариант армирования для повышения жесткости и несущей способности пластиковых шайб.

*Выводы.* Для увеличения несущей способности соединений на клеенных стеклопластиковых шайбах принят вариант армирования пластика с применением аддитивных технологий CFC-печати и использования различных материалов армирующего волокна.

**Ключевые слова:** аддитивные технологии, анизотропные материалы, деревянные конструкции, соединение, армирование, шайба, пластик

**Для цитирования:** Залилов И.В., Арискин М.В., Мартышкин Д.О. Аддитивные технологии для повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб соединений деревянных конструкций. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):16–27. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-16-27](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-16-27)

#### **Вклад авторов**

Залилов И.В. – сбор и анализ результатов натуральных испытаний, написание текста научной работы.

Арискин М.В. – постановка задач научной работы, анализ результатов научной работы.

Мартышкин Д.О. – анализ результатов научной работы.

#### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 07.05.2024*

*Поступила после рецензирования 17.06.2024*

*Принята к публикации 04.07.2024*

## **ADDITIVE TECHNOLOGIES FOR IMPROVING THE STRENGTH AND DEFORMATION CHARACTERISTICS OF PLASTIC WASHER JOINTS OF WOODEN STRUCTURES**

I.V. ZALILOV✉

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

D.O. MARTYSHKIN

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

#### **Abstract**

*Introduction.* Modern wooden structures are mostly connected by mechanical working joints. To increase the reliability of nodal joints, various kinds of washers can be pressed, inserted, or glued into the wood of the elements, thus ensuring the transmission of forces from one element to another. Joints on glued washers can transfer significant forces on a relatively small area of mutual contact, which is due to their high load-bearing capacity. Thus, the gluing of steel washers in places of increased stress concentration during force transfer ensures a significant redistribution of buckling/cracking stresses over a larger area of the connected parts. However, steel washers are highly corrosive, so additional measures are required to protect metal parts from corrosion or to replace the material with the composites. The results of full-scale tests of the samples with glued-in plastic washers are used to consider the ways of increasing the strength and deformation characteristics of the plastic washer material by applying additive technologies.

*Aim.* To increase the load-bearing capacity of the wooden structure joints by increasing the strength and deformation characteristics of the glued washer material.

*Materials and methods.* A method for full-scale tests of wooden specimens with glued fiberglass washers is presented. The wooden elements are made of second grade pine, while the washers are of REC Formax and REC Friction plastics. The test was performed in compression along the fibers, with control of vertical shear deformations. The methods of increasing the strength and deformation characteristics of plastic washers by using additive technologies are considered.

*Results.* Using the data of full-scale tests the diagrams of sample deformations on glued plastic washers are drawn, the obtained results are analyzed. The sufficiently high plasticity of washer materials is established.

The ways for increasing the strength and deformation characteristics of plastic washers, particularly by reinforcing the plastic washers is suggested.

*Conclusions.* In order to increase the load-bearing capacity of the joints on the glued fiberglass washers, the reinforcement of plastic using additive CFC printing technologies and the use of different reinforcing fiber materials is adopted.

**Keywords:** additive technologies, anisotropic materials, wooden structures, joint reinforcement, washer, plastic

**For citation:** Zalilov I.V., Ariskin M.V., Martyshkin D.O. Additive technologies for improving the strength and deformation characteristics of plastic washer joints of wooden structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):16–27. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-16-27](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-16-27)

#### **Authors contribution statement**

Zalilov I.V. – collection and analysis the results of full-scale tests, performing calculations, writing the manuscript.

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

Martyshkin D.O. – analyzing the data obtained.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflicts of interest.

*Received 07.05.2024*

*Revised 17.06.2024*

*Accepted 04.07.2024*

## **Введение**

Одним из актуальных направлений в исследовании строительных структур является разработка узлов. Узловые соединения деревянных конструкций чаще всего выполняются с применением металлических связей, таких как клеенные стержни, металлические зубчатые пластины, клеенные плоские стержни, кольцевые шпонки, стальные шайбы [1–7] и др., которые клеиваются или впрессовываются в деревянные элементы, обеспечивая передачу усилий от одного элемента к другому. Обладая достаточно высокой несущей способностью, металлические вкладыши в процессе эксплуатации подвержены коррозии, что вызывает необходимость проведения антикоррозионных мероприятий как в процессе эксплуатации, так и при изготовлении соединений.

На основе достоинств соединений на клеенных стальных и стеклопластиковых шайбах [6, 8, 9] предложено коррозионностойкое соединение деревянных конструкций с применением клеенных пластиковых шайб [10]. В основу предлагаемого соединения положена идея передачи сосредоточенного усилия, действующего на механические вкладыши на достаточно большую площадь по сравнению с размером самой связи. При этом клеенные шайбы выполняются из коррозионностойкого материала. В качестве материала шайб приняты пластики REC Formax и REC Friction.

Главное отличие предложенного соединения от [6, 8, 9] заключается в применении аддитивных технологий для изготовления пластиковых шайб. Применение данной технологии

позволяет моделировать и изготавливать шайбы с различными параметрами (диаметр, толщина, внутреннее отверстие) и характеристиками (рис. 1).

Для установления перспективности использования клеенных пластиковых шайб проведены пилотные испытания [10], которые показали удовлетворительные результаты по сравнению с клеенными стеклопластиковыми шайбами [8, 9]. Но вместе с тем отмечена высокая пластичность шайб при нагружении образцов, что связано с пониженными значениями деформативных характеристик материала шайб. В связи с этим необходимо рассмотреть варианты повышения несущей способности клеенных пластиковых шайб за счет увеличения деформативных показателей пластиков.

Далее представлены анализ результатов пилотных испытаний и варианты увеличения деформативных характеристик пластиковых шайб.

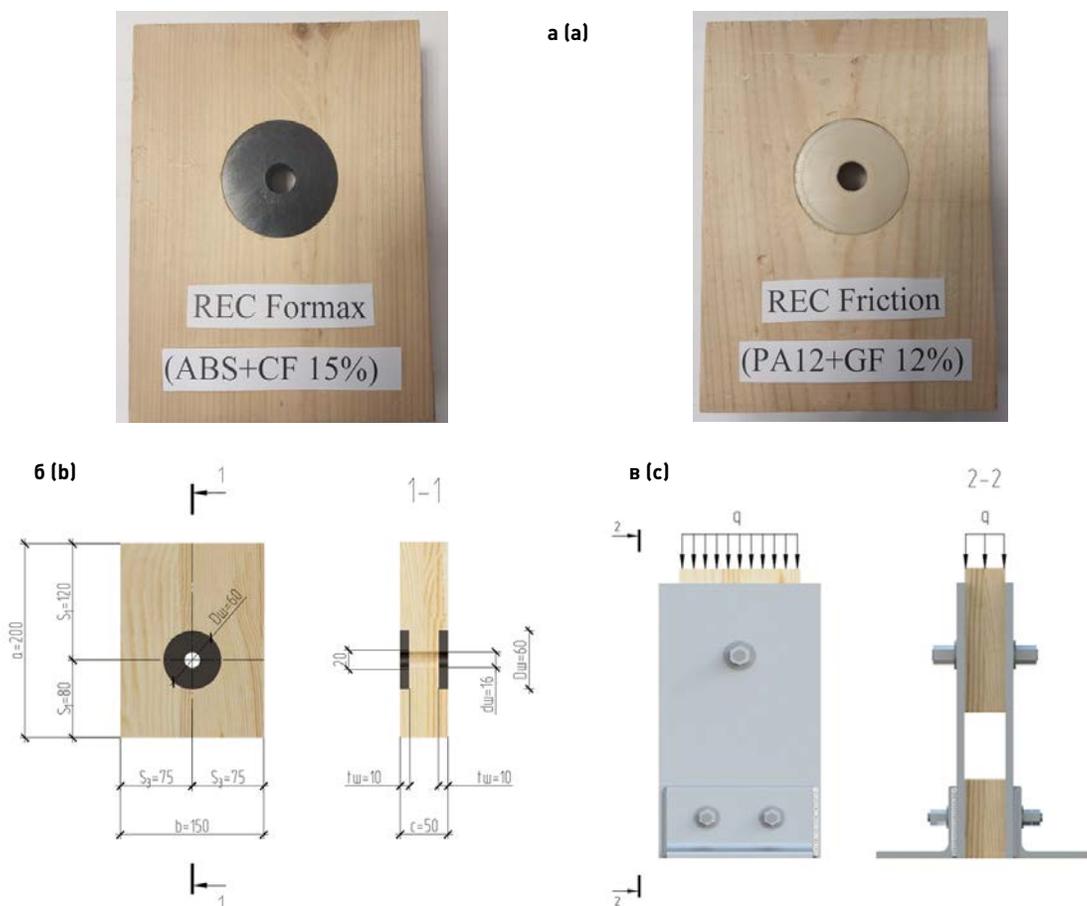


Рис. 1. Образцы на клеенных пластиковых шайбах: а – общий вид образцов; б – размеры образца; в – схема нагружения

Fig. 1. Samples with glued plastic washers: a – general view of samples; b – dimensions of samples; c – loading scheme

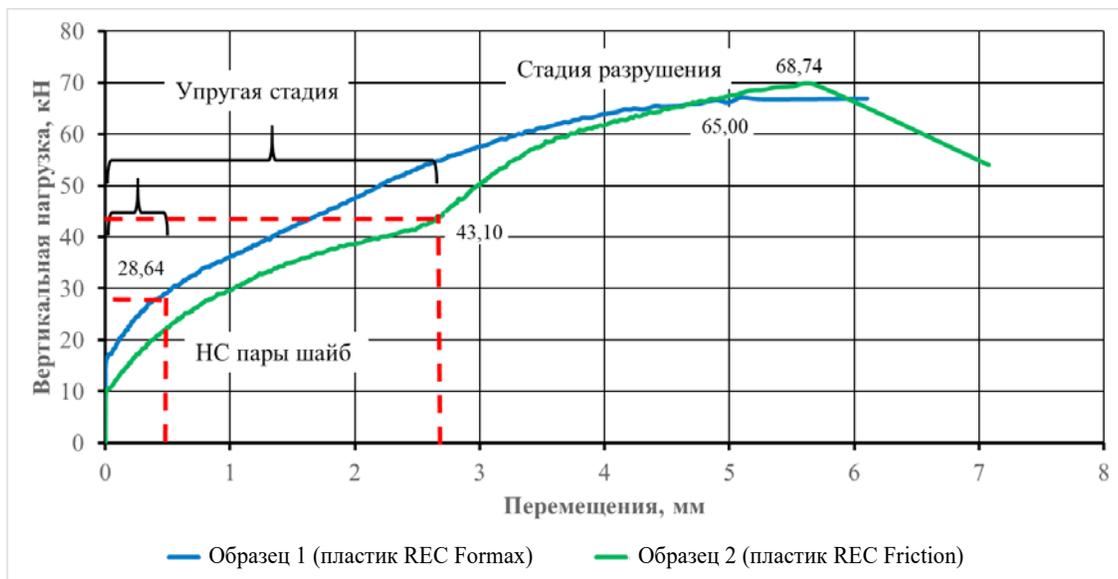


Рис. 2. Деформации сдвига в образцах  
Fig. 2. Shear strains in the samples

## Проведение натуральных испытаний и анализ результатов

Для натуральных испытаний были изготовлены образцы с клееными шайбами. В качестве материала для печати шайб применялись композитные пластики REC Formax и REC Friction [10].

Изготовление шайб производится на 3D-принтере Picaso Designer X PRO с технологией печати Fused filament fabrication (FFF).

Испытания проводились до полного разрушения образцов. Разрушающая нагрузка ( $P_{разр}$ ) образца 1 составила 65,0 кН, для образца 2 – 68,74 кН. График нарастания деформаций сдвига представлен на рис. 2.

Как видно из графика, деформации возникают в образце 1 при нагрузке 15,86 кН, в образце 2 – при нагрузке 10,08 кН. При дальнейшем нагружении наблюдается рост деформаций: образец 1 до нагрузки 28,16 кН и перемещениях 0,43 мм, образец 2 до нагрузки 43,10 кН и перемещениях 2,63 мм, что можно считать упругой работой и принять за несущую способность пары шайб. После чего мы наблюдаем перегиб на графике – происходит смятие шайб (без разрушения) и в работу включается древесина, что было отмечено при испытаниях (резкий треск в образцах). Очевидно, это связано с пониженными значениями прочности и модуля упругости пластиков. Далее наблюдаем значительный рост деформаций при увеличении нагрузки до полного разрушения образцов.

Как отмечено ранее, невысокие деформативные показатели пластиков REC Formax и REC Friction: модуль упругости при растяжении равен 3210 и 1800 МПа соответственно, что значительно ниже, чем у стеклотекстолита КАСТ-В 21000 МПа по основе и 17000 по утку по ГОСТ 10292-74 [11].

Несмотря на наличие армирующих волокон, пилотные испытания показали относительно высокую пластичность материалов, что связано в первую очередь с малой длиной

армирующих волокон, а также с отсутствием их ориентации. В данном случае композитные волокна позволяют увеличить несущие характеристики и жесткость готового изделия по сравнению с аналогичным, выполненным только из материала матрицы данных пластиков (abs и pa12 соответственно), а также снизить объемную усадку при печати.

В связи с этим планируется испытать образцы с шайбами, изготовленными с использованием CFC-печати (continuous fiber coextrusion). Преимущество данной технологии заключается в создании армирования непрерывными волокнами, что позволяет значительно увеличить несущие характеристики. Высокие показатели армирующих волокон позволяют создавать детали с анизотропией и управлять ей в необходимых направлениях в структуре изделия. Печать на 3D-принтере позволяет полностью автоматизировать процесс армирования детали, тем самым обеспечивая одностадийный процесс производства.

### Методы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб

Кокэструзия композитного волокна (CFC) – это процесс аддитивного производства для изготовления легких и прочных композитных деталей сложной формы и внутренней структуры. Процесс основан на внедрении композитного волокна в расплавленный пластик с помощью специально разработанной печатающей головки. Печатающая головка, показанная на рис. 3, включает два экструдера – пластиковый (FFF) и композитный (CFC). Композитный экструдер имеет два входа и одно сопло. Центральный вход предназначен для композитного материала, а боковые – для пластика. Композитное волокно проходит через центральный канал и покрывается расплавленным пластиком, подаваемым через боковой канал в блок экструдера.

Anisoprint Composer – аддитивное устройство для производства функциональных деталей из композитных материалов (рис. 4). За счет управляемой укладки армирующего волокна удается достичь высоких физико-механических характеристик изготавливаемой детали.

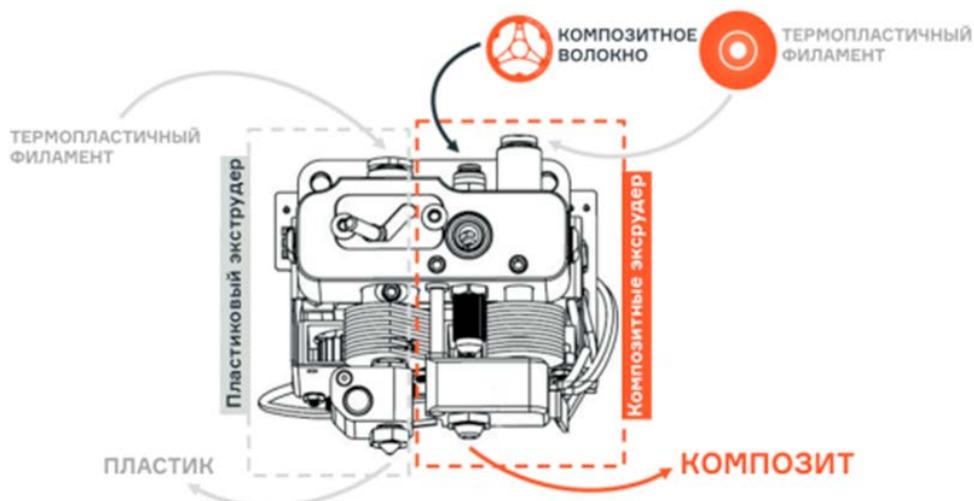
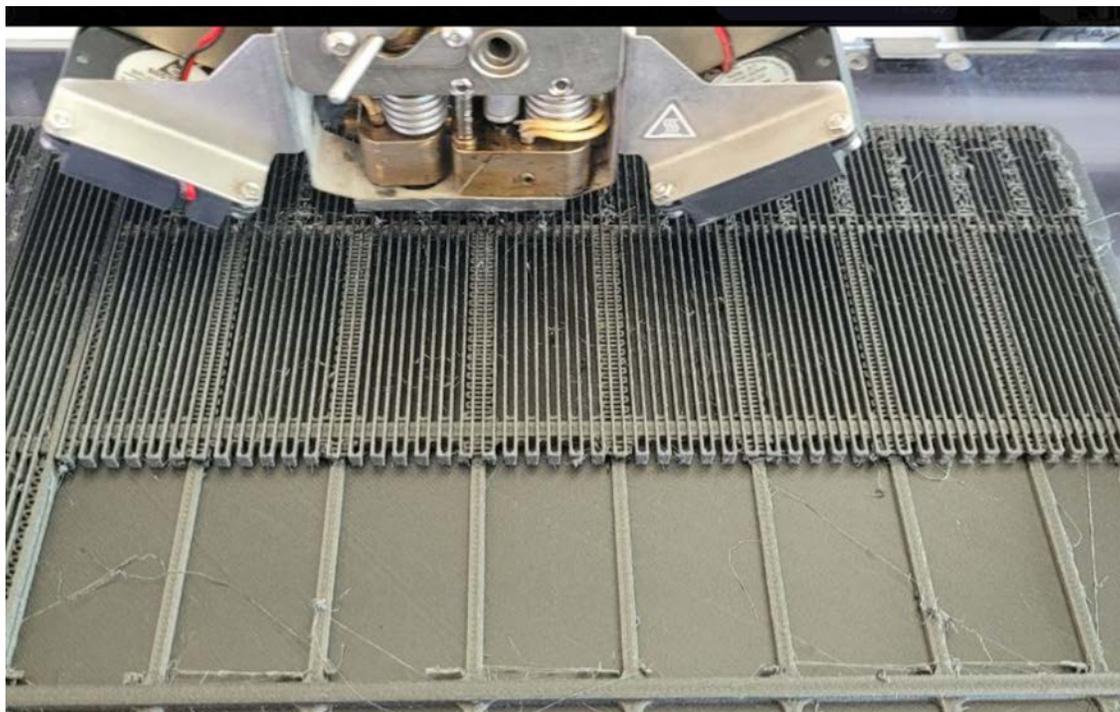


Рис. 3. Схема печатающей головы Anisoprint Composer

Fig. 3. Layout of the Anisoprint Composer print head



**Рис. 4.** Процесс печати Anisoprint Composer  
**Fig. 4.** Anisoprint Composer printing process

Композитное волокно с расплавленным пластиком послойно укладывается через сопло экструдера на рабочую поверхность. После печати нескольких слоев пластика принтер начнет печать периметров и заполнение композитного волокна. Таким образом формируется деталь, армированная композитным волокном. Эта технология позволяет производить высококачественные армированные изделия, используя при этом гибкость форм и широкий ассортимент пластиков.

Преимущества данной технологии включают повышенную прочность и жесткость изде-

лий, а также возможность создавать сложные геометрические формы. Это находит применение в различных отраслях, включая авиацию, автомобилестроение, медицину и др.

Волокно может прокладываться по любым траекториям. Некоторые другие технологии, такие как, например, укладка ленты, не позволяют укладывать волокно под теми же углами и радиусом. Минимальный радиус окружности составляет 1,1 мм. Пример такой укладки показан на рис. 5.

Данная технология позволяет использовать различные пластики с температурой плавления до 270 °С. Можно использовать пластики ABS, PLA, PETG, PA и PC.



**Рис. 5.** Пример укладки волокна по сложной траектории  
**Fig. 5.** Fiber laying pattern along a complex trajectory

Материал можно варьировать для достижения наилучших эксплуатационных или экономических параметров изделий в зависимости от поставленных целей.

В качестве армирующих волокон могут применяться углеродные, базальтовые и стеклянные волокна.

Углеродное волокно используется в тех случаях, когда нужна максимальная прочность. Его прочность сравнима с самыми прочными титановыми сплавами, но масса в три раза ниже. Примеры изделий с применением углеродного волокна показаны на рис. 6. Характеристики углеродного волокна представлены в табл. 1.

Базальтовое волокно характеризуется более низкой прочностью, однако является более доступным в экономическом плане. Это волокно было разработано в основном для использования в радиопрозрачных деталях, а также там, где не нужна большая жесткость. Представляет компромиссный вариант между прочностью и ценой. Примеры изделий с применением базальтового волокна показаны на рис. 7. Характеристики представлены в табл. 2.

Характеристики стекловолокна, пропитанного специальным полимерным составом, обеспечивающим качественную пропитку и адгезию между полимерами и волокном, представлены в табл. 3. Примеры изделий с применением стекловолокна показаны на рис. 8.

Процесс 3D-печати с армированием волокнами требует специального программного обеспечения и знаний, а также может потребовать настройки для оптимальных результатов

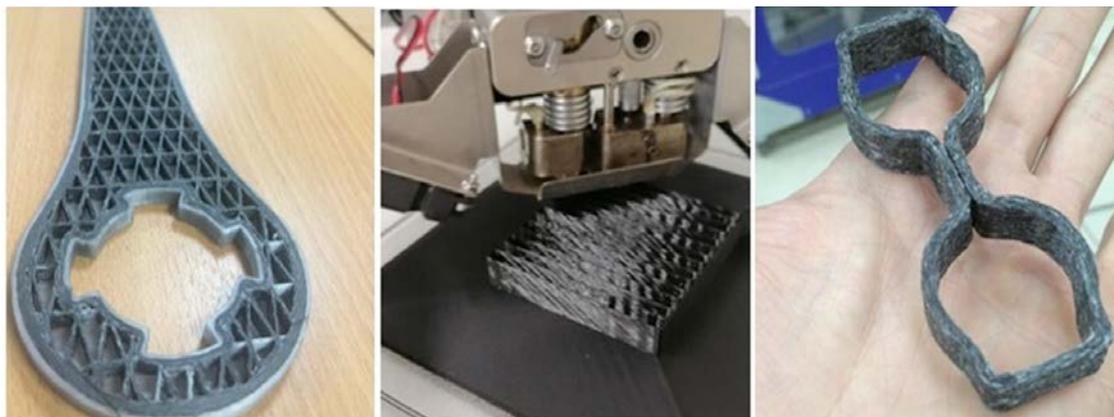


Рис. 6. Примеры печати углеродным волокном  
Fig. 6. Examples of carbon fiber printing

Таблица 1

### Характеристики углеродного волокна

Table 1

### Characteristics of carbon fiber

Эффективный диаметр, мм	Линейная плотность, текс	Разрушающая нагрузка, Н	Модуль Юнга, ГПа	Максимальная температура печати, °С
0,35 ± 0,01	145 ± 5	212 ± 10	149 ± 5	270



**Рис. 7.** Примеры печати базальтовым волокном  
**Fig. 7.** Examples of basalt fiber printing

Таблица 2

**Характеристики базальтового волокна**

Table 2

**Characteristics of basalt fiber**

Эффективный диаметр, мм	Линейная плотность, текс	Разрушающая нагрузка, Н	Модуль Юнга, ГПа	Максимальная температура печати, °С
0,28 ± 0,01	130 ± 10	110 ± 6	50 ± 4	270

Таблица 3

**Характеристики стекловолокна**

Table 3

**Characteristics of glass fiber**

Эффективный диаметр, мм	Линейная плотность, текс	Разрушающая нагрузка, Н	Модуль Юнга, ГПа	Максимальная температура печати, °С
0,32 ± 0,01	175 ± 5	100 ± 5	45 ± 5	270



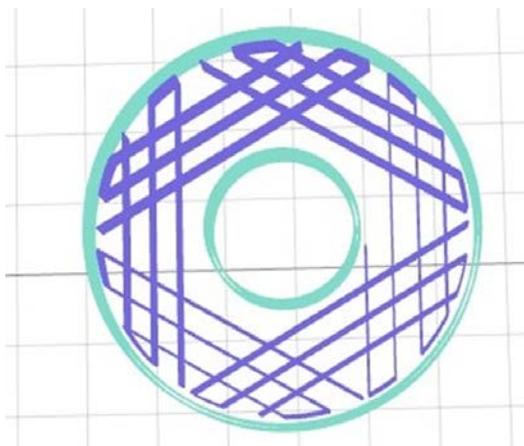
**Рис. 8.** Примеры печати стекловолокном  
**Fig. 8.** Examples of glass fiber printing

в зависимости от конкретных потребностей проекта.

Для подготовки печати используется специализированное программное обеспечение (ПО) – слайсер Anisoprint Aura, который включает в себя весь набор настроек для печати композитами.

ПО позволяет подготовить 3D-модель для печати, оптимизировать и настроить схему армирования и объемную долю армирующего волокна в разных частях детали для усиления нагруженных участков.

Для увеличения деформативных характеристик пластиковых шайб на рис. 9 представлен вариант армирования, предложенный технологом 3D-печати компании Anisoprint.



**Рис. 9.** Вариант армирования пластиковой шайбы  
**Fig. 9.** Reinforcement of plastic washer

## Заключение

Предварительные испытания соединений деревянных конструкций с применением клеенных пластиковых шайб показали удовлетворительные результаты. Однако отмечена пластичность шайб, что снижает несущую способность пары шайб. Рассмотрены методы повышения прочностных и деформативных характеристик пластиковых шайб путем применения аддитивных технологий, а именно – с использованием CFC-печати. За счет армирования непрерывными композитными волокнами планируется значительно увеличить жесткость и несущую способность шайб, а использование 3D-печати позволит на этапе проектирования элемента управлять параметрами, характеристиками и вариантами армирования изделия, тем самым обеспечивая рациональный расход материала.

## Список литературы

1. Турковский С.Б., Погорельцев А.А., Преображенская И.П. Клеенные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). Москва: Стройматериалы; 2013.
2. Федосов С.В., Котлов В.Г., Актуганов А.А. Индустриальные деревянные конструкции на металлических зубчатых пластинах. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2013;(11–12):39–43.
3. Руднев И.В., Жаданов В.И., Лисов С.В. Соединения элементов деревянных конструкций с применением клеенных стальных пластин. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014;(4):5–12.
4. Лисицкий И.И., Жаданов В.И., Руднев И.В. Деревянные фермы с узловыми соединениями на клеенных плоских стержнях. Промышленное и гражданское строительство. 2020;(4):9–15. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15>
5. Вдовин В.М., Карпов В.Н., Галахов М.С. Клеенные кольцевые шпонки в соединениях деревянных конструкций. Пенза: ПГУАС; 2011.
6. Вдовин В.М., Арискин М.В., Дудорова Д.Д. Клеенные металлические шайбы в соединениях деревянных конструкций. Пенза: ПГУАС; 2012.

7. *Ишмаева Д.Д., Вдовин В.М.* Жесткие узлы клееных деревянных балочных элементов на клеенных стальных шайбах. Вестник Оренбургского государственного университета. 2014;(1):189–195.
8. *Вдовин В.М., Мартышкин Д.О.* Коррозионнстойкое немагнитное соединение элементов деревянных конструкций. Региональная архитектура и строительство. 2019;(4):103–108.
9. *Арискин М.В., Мартышкин Д.О.* Соединения на клеенных стеклопластиковых шайбах в деревянных конструкциях. Региональная архитектура и строительство. 2022;(2):96–103. [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2022\\_2\\_96](https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_96)
10. *Арискин М.В., Залилов И.В.* Аддитивные технологии в изготовлении шайб соединений деревянных конструкций. Региональная архитектура и строительство. 2023;(3):144–151. [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2023\\_3\\_144](https://doi.org/10.54734/20722958_2023_3_144)
11. ГОСТ 10292-74. Стеклотекстолит конструкционный. Технические условия. Москва: Издательство стандартов; 2005.

## References

1. *Turkovsky S.B., Pogoreltsev A.A., Preobrazhenskaya I.P.* Glued wooden constructions with nodes on the pasted rods in the modern construction (TsNIISK system). Moscow: Stroimaterialy Publ.; 2013. [In Russian].
2. *Fedosov S.V., Kotlov V.G., Aktuganov A.A.* Industrial wood constructions on metal gear plate. News of higher educational institutions. Construction. 2013;(11-12):39–43. [In Russian].
3. *Rudnev I.V., Zhadanov V.I., Lisov S.V.* Connections of wooden constructions elements with the use of the pasted steel plates. News of higher educational institutions. Construction. 2014;(4):5–12. [In Russian].
4. *Lisitsky I.I., Zhadanov V.I., Rudnev I.V.* Wooden trusses with nodal joints on glued flat rods. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2020;(4):9–15. [In Russian]. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2020.04.09-15>
5. *Vdovin V.M., Karpov V.N., Halakhov M.S.* Ring dowel glued in timber structures joints. Penza: Penza State University of Architecture and Construction; 2011. [In Russian].
6. *Vdovin V.M., Ariskin M.V., Dudorova D.D.* Glued metal washers in the joints of wooden structures. Penza: Penza State University of Architecture and Construction (PSUAC); 2012. [In Russian].
7. *Ishmaeva D.D., Vdovin V.M.* Rigid connections of glued wooden beam elements on glued steel washers. Vestnik of the Orenburg State University. 2014;(1):189–195. [In Russian].
8. *Vdovin V.M., Martyshkin D.O.* Corrosion-resistant non-magnetic connection of elements of wooden structures. Regional Architecture and Engineering. 2019;(4):103–108. [In Russian].
9. *Ariskin M.V., Martyshkin D.O.* Connections on glued fiberglass washers in wooden structures. Regional Architecture and Engineering. 2022;(2):96–103. [In Russian]. [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2022\\_2\\_96](https://doi.org/10.54734/20722958_2022_2_96)
10. *Ariskin M.V., Zalilov I.V.* Additive technologies for making washers of wooden structure connections. Regional Architecture and Engineering. 2023;(3):144–151. [In Russian]. [https://doi.org/10.54734/20722958\\_2023\\_3\\_144](https://doi.org/10.54734/20722958_2023_3_144)
11. State Standard 10292-74. Constructive glass-cloth-base laminate. Specifications. Moscow: Publishing House of Standards; 2005. [In Russian].

## Информация об авторах / Information about the authors

**Илья Вадимович Залилов**<sup>✉</sup>, аспирант кафедры строительных конструкций, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

e-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

**Ilya V. Zalilov**<sup>✉</sup>, Postgraduate student of the Department of Building Structures, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

e-mail: zalilov.ilya@yandex.ru

**Максим Васильевич Арискин**, канд. техн. наук, доцент кафедры строительных конструкций, директор центра практики студентов и содействия трудоустройства выпускников, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства, Пенза

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

**Maxim V. Ariskin**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Structures, Director of the Center for Student Practice and Employment Promotion of Graduates, Penza State University of Architecture and Construction, Penza

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

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

e-mail: historical95@mail.ru

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

e-mail: historical95@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 614.841.45

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-28-46](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-28-46)

EDN: TLKAPC

# ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ В ПРОЦЕССЕ УСКОРЕННОГО КЛИМАТИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ

М.А. КОМАРОВА<sup>1</sup>, канд. хим. наук

И.А. ГРИШИН<sup>1</sup>

Н.О. МЕЛЬНИКОВ<sup>1,2,✉</sup>, канд. техн. наук

М.В. ШАЛАБИН<sup>1</sup>

М.И. ВЕДЯКОВ<sup>1,3</sup>

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

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

<sup>3</sup>ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

## Аннотация

**Введение.** Одним из важнейших параметров при обеспечении пожарной безопасности является гарантийный или прогнозируемый срок эксплуатации огнезащитного покрытия в зависимости от условий службы. 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. Натурное подтверждение долговечности покрытий занимает длительное время, поэтому актуальным является проведение испытания по ускоренным методикам.

**Цель.** Апробация методов испытаний для определения стойкости к воздействию климатических факторов при старении в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1 по ГОСТ 15150-69) и сохранности эффективности покрытий стальных строительных конструкций в процессе эксплуатации на примере современного огнезащитного покрытия.

**Материалы и методы.** В работе проведено циклическое искусственное старение образцов огнезащитного покрытия на 5, 15 и 25 лет по методу 6 ГОСТ 9.401-2018 и оценена стойкость к воздействию климатических факторов и сохранность огнезащитных свойств в процессе эксплуатации двумя методами: термическим анализом по ГОСТ Р 53293-99 и огнезащитной эффективностью по ГОСТ Р 53295-2009. Для исследования применялись 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 в составе антикоррозионной грунтовки «ДЕКОПОКС-ФАСТ» толщиной сухого слоя 80 мкм, атмосферостойкой огнезащитной краски «ДЕКОТЕРМ-ХРОМ-Р» толщиной сухого слоя 870 мкм и финишным покрытием двухкомпонентной полиуретановой грунт-эмалью «ДЕКОПУР-ФЛЕКС» толщиной сухого слоя 50 мкм.

**Результаты.** Установлено, что огнезащитная эффективность с увеличением количества циклов искусственного старения несколько снижается и составляет 12 % в сторону уменьшения от контрольного образца при 224 циклах (25 лет).

**Выводы.** Прогнозируемый срок службы исследуемой системы покрытия в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1) с сохранением огнезащитной эффективности при условии соблюдения всех требований технологического процесса получения покрытия составляет не менее 25 лет.

**Ключевые слова:** огнезащитные покрытия, огнезащитная эффективность, термический анализ, воздействие климатических факторов, сохранение огнезащитных свойств

**Для цитирования:** Комарова М.А., Гришин И.А., Мельников Н.О., Шалабин М.В., Ведяков М.И. Оценка эффективности огнезащитных покрытий в процессе ускоренного климатического старения. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):28–46. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-28-46](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-28-46)

#### **Вклад авторов**

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

#### **Финансирование**

Исследование выполнено в рамках договорных работ между АО «НИЦ «Строительство» и ООО «Деко».

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 04.07.2024*

*Поступила после рецензирования 05.08.2024*

*Принята к публикации 08.08.2024*

## **EFFICIENCY ASSESSMENT OF FLAME RETARDANT COATINGS IN THE PROCESS OF ACCELERATED CLIMATIC AGING**

M.A. KOMAROVA<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Chem.)

I.A. GRISHIN<sup>1</sup>

N.O. MELNIKOV<sup>1,2,✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

M.V. SHALABIN<sup>1</sup>

M.I. VEDYAKOV<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> *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*

<sup>2</sup> *D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Miusskaya square, 9, bld. 1, Moscow, 125047, Russian Federation*

<sup>3</sup> *Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation*

### **Abstract**

*Introduction.* The warranty or predicted service life of the flame retardant coatings, depending on the service conditions, is a crucial parameter in ensuring fire safety. Service life, or durability, can be defined as the ability of the flame retardant coating to resist external influences, i.e., to remain unchanged and retain its efficiency under climatic and various adverse factors. Since full-scale testing of the coatings' durability is time consuming, accelerated testing methods are relevant.

*Aim.* To test methods for determining the resistance to climatic factors during aging in an open industrial atmosphere (HL1 (cold), UHL1 (moderate and cold macroclimatic regions) according to State Standard 15150-69). In addition, to test the efficiency of coatings of steel building structures under operation on the example of a modern fire retardant coating.

*Materials and methods.* The samples of the flame retardant coating were cyclically aged for 5, 15, and 25 years according to method 6 of State Standard 9.401-2018. The resistance to climatic factors and preservation of flame retardant characteristics during operation was evaluated according to State Standards R 53293-99 and R 53295-2009. The plates made of 08kp and 08ps steel sheets according to State Standards 16523-97 and 9045-93 in the size of 600 × 600 × 5 mm with a flame retardant applied to it from the front side

as an anticorrosive primer “DEKOPKS-FAST” with a dry layer thickness of 80 microns, weather-resistant flame retardant paint “DEKOTHERM-KHRM-R” with a dry layer thickness of 870 microns and finish coating with two-component polyurethane primer-enamel “DEKOPUR-FLEX” with a dry layer thickness of 50 microns.

*Results.* The flame retardant efficiency was found to decrease slightly with increasing number of artificial aging cycles and amount to 12 % downward from the control sample at 224 cycles (25 years).

*Conclusions.* The predicted service life of the investigated coating system in open industrial atmosphere (HL1, UHL1) with preservation of the flame retardant efficiency if all requirements of the technological process of obtaining the coating are met is not less than 25 years.

**Keywords:** flame retardant coatings, flame retardant efficiency, thermal analysis, exposure to climatic factors, preservation of flame retardant characteristics

**For citation:** Komarova M.A., Grishin I.A., Melnikov N.O., Shalabin M.V., Vedyakov M.I. Efficiency assessment of flame retardant coatings in the process of accelerated climatic aging. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):28–46. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-28-46](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-28-46)

#### **Authors contribution statement**

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

#### **Funding**

The research was carried out within a contract between JSC Research Center of Construction and LLC “Deko”.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 04.07.2024*

*Revised 05.08.2024*

*Accepted 08.08.2024*

## **Введение**

В настоящее время средства огнезащиты для строительных конструкций используются повсеместно в большом объеме с целью обеспечения нормируемых требований пожарной безопасности зданий и сооружений.

В соответствии с ТР ЕАЭС 043/2017 [1] техническая документация на средства огнезащиты должна содержать информацию о технических показателях, характеризующих область их применения, способ подготовки поверхности, виды и марки грунтовок, способ нанесения на защищаемую поверхность, условия сушки, огнезащитную эффективность этих средств, способ защиты от неблагоприятных климатических воздействий, условия и срок эксплуатации огнезащитных покрытий, меры безопасности при проведении огнезащитных работ, а также порядок транспортирования и хранения.

Одним из важнейших параметров при обеспечении пожарной безопасности является гарантийный или прогнозируемый срок эксплуатации огнезащитного покрытия в зависимости от условий службы. 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.

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. Нет и системы подтверждения соответствия покрытий заявленным требованиям пожарной безопасности по истечении срока эксплуатации в зависимости от условий окружающей среды. Это связано также с недостаточностью данных по старению различного рода огнезащитных покрытий и с проведением научно-исследовательских работ в данной области.

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.

Ранее в работе [2] были представлены разработанные методы ускоренных климатических испытаний тонкослойных вспучивающихся и конструктивных огнезащитных покрытий, оценки свойств и их сохранности методами термического анализа и огнезащитной эффективности. На их основе специалистами НЭБ ПБС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко подготовлен проект национального стандарта «Конструкции стальные строительные с огнезащитными покрытиями. Методы испытаний антикоррозионных свойств и стойкости к воздействию климатических факторов в процессе эксплуатации». Стандарт находится на стадии введения в действие и может быть использован при определении гарантийного срока эксплуатации огнезащитных покрытий стальных строительных конструкций, при этом он не распространяется на определение их пределов огнестойкости.

Данная работа посвящена апробации методики и оценки сохранения огнезащитных свойств при климатическом старении в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1 по ГОСТ 15150-69 [3]) на примере современного огнезащитного покрытия.

Объектом исследования является огнезащитное покрытие в составе:

- антикоррозионная грунтовка «ДЕКОПОКС-ФАСТ» (ТУ 2312-015-12943630-2017) толщиной сухого слоя 80 мкм;
- атмосферостойкая огнезащитная краска «ДЕКОТЕРМ-ХРОМ-Р» (ТУ 2317-005-12943630-2016) толщиной сухого слоя 870 мкм;
- финишное покрытие – двухкомпонентная полиуретановая грунт-эмаль «ДЕКОПУР-ФЛЕКС» (ТУ 2312-014-12943630-2017) толщиной сухого слоя 50 мкм.

В качестве образцов используются стальные пластины из листовой стали марки 08кп и 08пс по ГОСТ 16523-97 [4] и ГОСТ 9045-93 [5] размером 600 × 600 × 5 мм с нанесенным с лицевой стороны огнезащитным покрытием. Допустимые отклонения по ширине и длине стальной пластины не превышают ± 5 мм, а по толщине – ± 0,5 мм. Обратная сторона и кромки пластин окрашены шпатлевкой ЭП-0010 по ГОСТ 28379-89 [6], которая обеспечивает защиту окрашиваемой поверхности в течение всего срока климатических испытаний. Для проведения испытаний использовали четыре образца. Один из них – контрольный, который не подвергался воздействию ускоренных климатических факторов.

## Методы испытания

Согласно программе испытаний проводилось циклическое искусственное старение образцов по методу 6 ГОСТ 9.401-2018 [7], после чего осуществлялась оценка стойкости огнезащитных покрытий к воздействию климатических факторов и сохранности огнезащитных свойств в процессе эксплуатации двумя методами: термическим анализом по ГОСТ Р 53293-99 [8] и огнезащитной эффективностью по ГОСТ Р 53295-2009 [9].

Искусственное старение проводили на 5, 15 и 25 лет. На рис. 1 представлен внешний вид образцов в климатической камере перед началом испытаний.

Режим испытаний, последовательность перемещения и время выдержки образцов в аппаратах в одном цикле приведены в табл. 1.

Визуальную оценку состояния покрытия после искусственного старения проводили по п. 9 ГОСТ 9.407-2015 [10]. При визуальном осмотре состояния покрытия оценивались виды разрушений, характеризующие декоративные и защитные свойства: растрескивание,



**Рис. 1.** Образцы в климатической камере TH-225 C перед началом испытаний  
**Fig. 1.** Samples in the climatic chamber TH-225 C before testing

Таблица 1

**Режим испытаний, последовательность перемещения и время выдержки образцов в аппаратах**

Table 1

**Test mode, sequence of movement, and exposure time of samples in the apparatuses**

Аппаратура	Параметры испытаний		Время выдержки образцов в одном цикле, ч
	Температура, °С	Относительная влажность, %	
Камера климатическая ТН-225 С, заводской номер LP 202209ТН008	40 ± 2	97 ± 3	2
Испытательная камера с напуском сернистого газа SO <sub>2</sub> , LRHS-297-RS02, заводской номер LP20-1351 (концентрация SO <sub>2</sub> [5+1] мг/м <sup>3</sup> )	40 ± 2	97 ± 3	2
Камера климатическая ТН-225 С, заводской номер LP 202209ТН008	Минус (30 ± 3)	Не нормируется	6
УФ-камера для испытаний на атмосферостойкость UV-ST-260, заводской номер LP 202209UV008, режим: 3 минуты орошения, 17 минут без орошения	60 ± 3	Не нормируется	5
Камера климатическая ТН-225 С, заводской номер LP 202209ТН008	Минус (60 ± 3)	Не нормируется	3
Выдержка на воздухе	15–30	Не более 80	6
ИТОГО			24

отслаивание, образование пузырей, растворение, сморщивание, коррозия металла, изменение цвета, меление и грязеудержание.

Допустимый уровень ухудшения защитных свойств должен быть не более 3 баллов (А33) по ГОСТ 9.407-2015 [10]. При этом площадь разрушения покрытия не должна превышать 15% поверхности изделия, площадь коррозионного разрушения – не более 1%.

Оценку прогнозируемого срока службы выполняли по п. 6.5.9 ГОСТ 9.401-2018 [7]. Коэффициент ускорения,  $K_y$ , принимался равным 41 для условий ХЛ1, УХЛ1.

Оценку сохранности огнезащитных свойств методами термического анализа, подготовку образцов и проведение испытаний выполняют согласно ГОСТ Р 53293-99 [8].

Для получения идентификационных характеристик образцов применяли автоматизированный прибор термического анализа, имеющий программное обеспечение для обработки результатов, термоанализатор синхронный модификации STA 449 F5 Jupiter STA, 60486-15, заводской номер STA449F5B-0328-M.

Условия проведения термического анализа представлены в табл. 2.

По результатам термического анализа определяются следующие значимые идентификационные характеристики:

- потеря массы при температурах: 200, 300, 400, 500 °С (по ТГ-кривым);
- зольный остаток при температуре 1000 °С (по ТГ-кривым);
- температура при потере массы: 5, 10, 20, 30, 50 % (по ТГ-кривым);
- температура максимума скорости потери массы (по ДТГ-кривым);
- максимальная скорость потери массы (по ДТГ-кривым).

Таблица 2

**Условия проведения термического анализа**

Table 2

**Requirements for thermal analysis**

Условия испытаний	Используемый метод (модуль)
	ТГ
Термопара (материал)	платина/платино-родий
Тигель (материал, объем)	корунд, 1 см <sup>3</sup>
Масса образца, мг	10
Форма образца	порошок
Атмосфера	аргон
Расход газа, мл/мин	30
Скорость нагрева, °С/мин	10
Конечная температура нагрева, °С	1000

По результатам термического анализа проводится оценка сохранности огнезащитных свойств по ряду критериев. По характеристикам термоаналитических кривых и расчетным данным покрытие сохраняет свои огнезащитные свойства при соблюдении следующих условий: зависимости термогравиметрические (ТГ), термогравиметрические по производной (ДТГ) имеют подобный вид, соответственно совпадает количество интервалов деструкции и совпадает количество пиков ДТГ.

Оценка огнезащитной эффективности покрытий проводится по п. 6 ГОСТ Р 53295-99 [8]. Сущность метода заключается в одностороннем тепловом воздействии на образец и определении времени от начала теплового воздействия на образец до наступления предельного состояния этого образца. Режим теплового воздействия задается в соответствии с ГОСТ 30247.0-94 [11].

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 исходного без старения менее чем на 20% в сторону уменьшения.

**Результаты ускоренных климатических испытаний**

Внешний вид покрытий после ускоренных климатических испытаний представлен на рис. 2–4. Оценку состояния проводят при помощи микроскопа (рис. 5).

Обобщенные результаты ускоренных климатических испытаний приведены в табл. 3.

По результатам оценки декоративных и защитных свойств прогнозируемый срок службы покрытия составляет не менее 25 лет.



**Рис. 2.** Состояние покрытия после 45 циклов старения  
**Fig. 2.** The coating after 45 aging cycles



**Рис. 3.** Состояние системы покрытия после 134 циклов старения  
**Fig. 3.** The coating system after 134 aging cycles



**Рис. 4.** Состояние системы покрытия после 224 циклов старения  
**Fig. 4.** The coating system after 224 aging cycles



**Рис. 5.** Оценка состояния поверхности покрытия после 224 циклов старения  
**Fig. 5.** Assessment of the coating surface after 224 aging cycles

Таблица 3

**Результаты ускоренных климатических испытаний**

Table 3

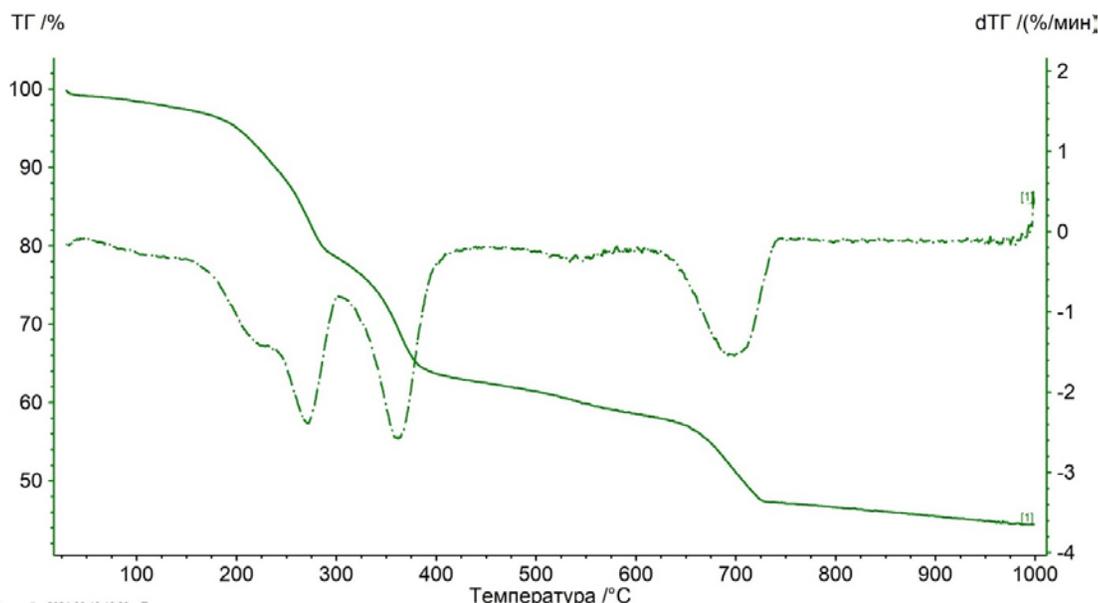
**Results of accelerated climatic tests**

Наименование показателя	НД на метод	Кол-во циклов	Состояние покрытия	Результат, лет
Срок службы	ГОСТ 9.401-2018 [7]	45	без изменений (рис. 2)	5
		134	без изменений (рис. 3)	15
		224	АД2, А30, Ц2 – слабое посветление (рис. 4)	25

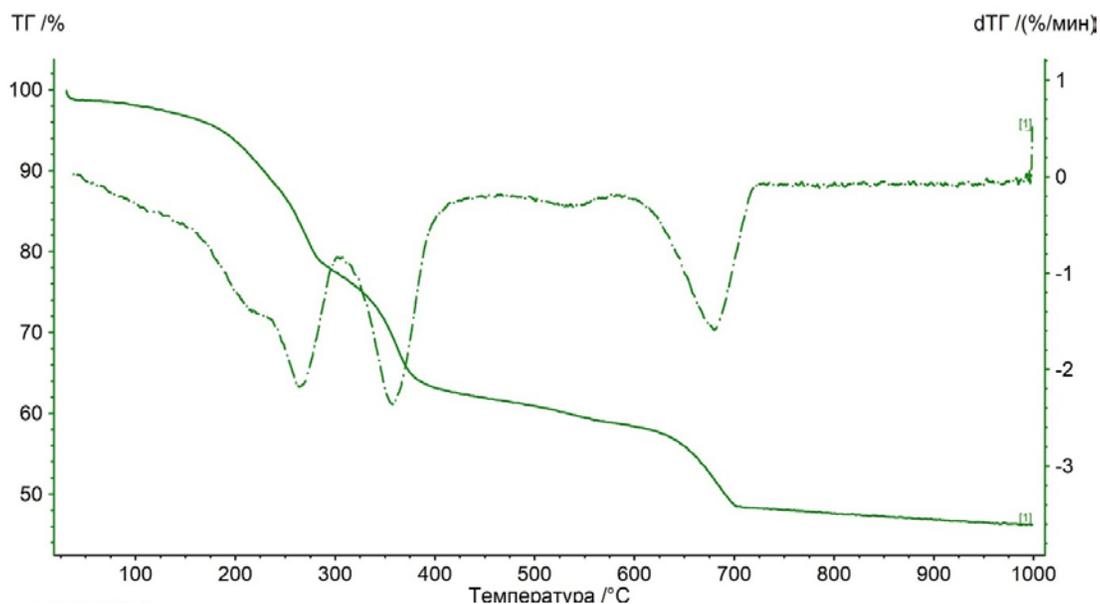
**Оценка сохранности огнезащитных свойств методами термического анализа**

Термоаналитические кривые образцов представлены на рис. 6–9. ТГ-кривая потери массы изображена сплошной линией. ДТГ-кривая скорости потери массы представлена штрихпунктирной линией.

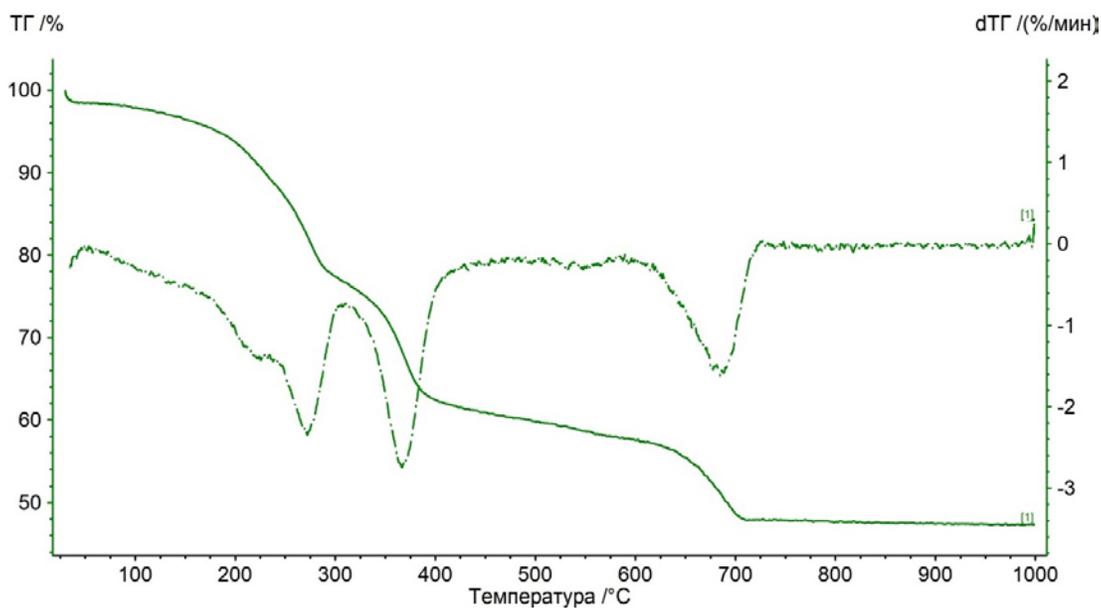
По результатам термического анализа были определены значимые идентификационные характеристики, представленные в табл. 4–7.



**Рис. 6.** Термоаналитические кривые контрольного образца без старения  
**Fig. 6.** Thermal analytical curves of the control unaged sample



**Рис. 7.** Термоаналитические кривые образца после 45 циклов старения  
**Fig. 7.** Thermal analytical curves of the sample after 45 aging cycles



**Рис. 8.** Термоаналитические кривые образца после 134 циклов старения  
**Fig. 8.** Thermal analytical curves of the sample after 134 aging cycles

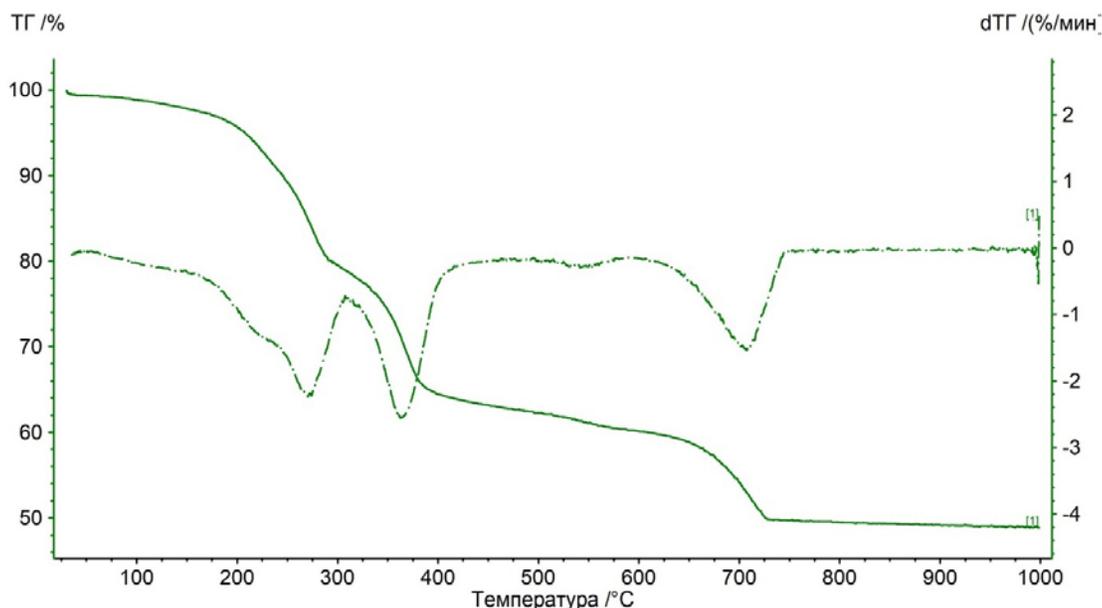


Рис. 9. Термоаналитические кривые образца после 224 циклов старения  
 Fig. 9. Thermal analytical curves of the sample after 224 aging cycles

Таблица 4

**Значимые идентификационные характеристики термического анализа контрольного образца без старения**

Table 4

**Significant identification characteristics of thermal analysis of the control unaged sample**

	Потеря массы, $\Delta m$ , %, при температуре, °C				Зольный остаток, %, (1000 °C)
	$\Delta m_{200}$	$\Delta m_{300}$	$\Delta m_{400}$	$\Delta m_{500}$	
$\Delta m_{cp}$	5,41	21,44	36,31	38,73	44,44
б	0,08	0,35	0,08	0,11	0,09
б <sup>2</sup>	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01
Температура, °C, при потере массы	$T_{5\%}$	$T_{10\%}$	$T_{20\%}$	$T_{30\%}$	$T_{50\%}$
$T_{cp}$	189,65	234,65	284,65	359,65	704,65
б	1,2	1,5	2,5	1,8	1,4
б <sup>2</sup>	1,4	3,0	6,3	3,2	2,8
Характеристика максимумов ДТГ-пиков в температурном интервале (температура максимума, $T_{max}$ /максимальная скорость потери массы, $A_{max}$ , %/мин)					
Интервал, °C	200–400		300–500		500–700
$T_{max\ cp}$	271,80/2,39		361,92/2,58		691,21/1,55
б	1,5/0,57		1,4/1,21		1,3/1,52
б <sup>2</sup>	8,6/0,20		1,4/0,29		1,6/0,45

Таблица 5

**Значимые идентификационные характеристики термического анализа образца после 45 циклов старения**

Table 5

**Significant identification characteristics of thermal analysis of the sample after 45 aging cycles**

	Потеря массы, $\Delta m$ , %, при температуре, °C				Зольный остаток, %, (1000 °C)
	$\Delta m_{200}$	$\Delta m_{300}$	$\Delta m_{400}$	$\Delta m_{500}$	
$\Delta m_{cp}$	6,47	22,59	36,88	39,11	46,26
б	0,08	0,35	0,08	0,11	0,09
б <sup>2</sup>	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01
Температура, °C, при потере массы	$T_{5\%}$	$T_{10\%}$	$T_{20\%}$	$T_{30\%}$	$T_{50\%}$
$T_{cp}$	171,33	226,33	276,33	356,33	686,33
б	1,2	1,5	2,5	1,8	1,4
б <sup>2</sup>	1,4	3,0	6,3	3,2	2,8
Характеристика максимумов ДТГ-пиков в температурном интервале (температура максимума, $T_{max}$ /максимальная скорость потери массы, $A_{max}$ , %/мин)					
Интервал, °C	200–400		300–500		500–700
$T_{max\ cp}$	264,66/2,18		358,17/2,36		679,72/1,59
б	1,5/0,57		1,4/1,21		1,3/1,52
б <sup>2</sup>	8,6/0,20		1,4/0,29		1,6/0,45

Таблица 6

**Значимые идентификационные характеристики термического анализа образца после 134 циклов старения**

Table 6

**Significant identification characteristics of thermal analysis of the sample after 134 aging cycles**

	Потеря массы, $\Delta m$ , %, при температуре, °C				Зольный остаток, %, (1000 °C)
	$\Delta m_{200}$	$\Delta m_{300}$	$\Delta m_{400}$	$\Delta m_{500}$	
$\Delta m_{cp}$	6,35	22,64	37,58	40,23	47,35
б	0,08	0,35	0,08	0,11	0,09
б <sup>2</sup>	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01
Температура, °C, при потере массы	$T_{5\%}$	$T_{10\%}$	$T_{20\%}$	$T_{30\%}$	$T_{50\%}$
$T_{cp}$	165,65	225,65	280,65	360,65	690,65
б	1,2	1,5	2,5	1,8	1,4
б <sup>2</sup>	1,4	3,0	6,3	3,2	2,8
Характеристика максимумов ДТГ-пиков в температурном интервале (температура максимума, $T_{max}$ /максимальная скорость потери массы, $A_{max}$ , %/мин)					
Интервал, °C	200–400		300–500		500–700
$T_{max\ cp}$	272,08/2,34		366,80/2,74		684,73/1,62
б	1,5/0,57		1,4/1,21		1,3/1,52
б <sup>2</sup>	8,6/0,20		1,4/0,29		1,6/0,45

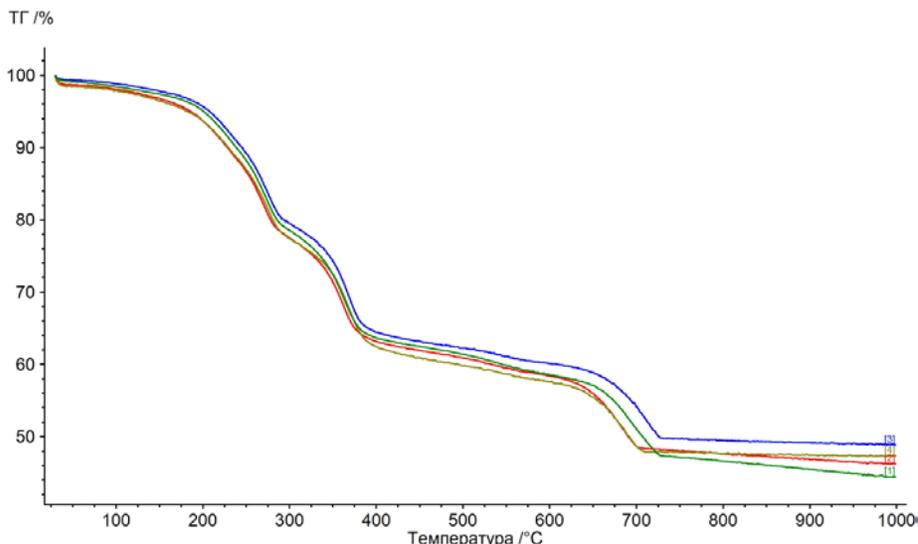
Таблица 7

**Значимые идентификационные характеристики термического анализа образца после 224 циклов старения**

Table 7

**Significant identification characteristics of thermal analysis of the sample after 224 aging cycles**

	Потеря массы, $\Delta m$ , %, при температуре, °C				Зольный остаток, %, (1000 °C)
	$\Delta m_{200}$	$\Delta m_{300}$	$\Delta m_{400}$	$\Delta m_{500}$	
$\Delta m_{cp}$	4,35	20,48	35,55	37,76	48,96
б	0,08	0,35	0,08	0,11	0,09
б <sup>2</sup>	0,01	0,12	0,01	0,01	0,01
Температура, °C, при потере массы	$T_{5\%}$	$T_{10\%}$	$T_{20\%}$	$T_{30\%}$	$T_{50\%}$
$T_{cp}$	200,13	240,13	290,13	365,13	720,13
б	1,2	1,5	2,5	1,8	1,4
б <sup>2</sup>	1,4	3,0	6,3	3,2	2,8
Характеристика максимумов ДТГ-пиков в температурном интервале (температура максимума, $T_{max}$ /максимальная скорость потери массы, $A_{max}$ , %/мин)					
Интервал, °C	200-400		300-500		500-700
$T_{max, cp}$	270,49/2,24		362,86/2,56		709,00/1,54
б	1,5/0,57		1,4/1,21		1,3/1,52
б <sup>2</sup>	8,6/0,20		1,4/0,29		1,6/0,45



**Рис. 10.** ТГ-кривые образцов огнезащитного покрытия:  
 синяя линия – контрольный без старения; салатная линия – после 45 циклов старения;  
 красная линия – после 134 циклов старения; зеленая линия – после 224 циклов старения

**Fig. 10.** TG-curves of the flame retardant coating samples:  
 blue line – control without aging; pale green line – after 45 aging cycles; red line – after 134 aging cycles;  
 green line – after 224 aging cycles

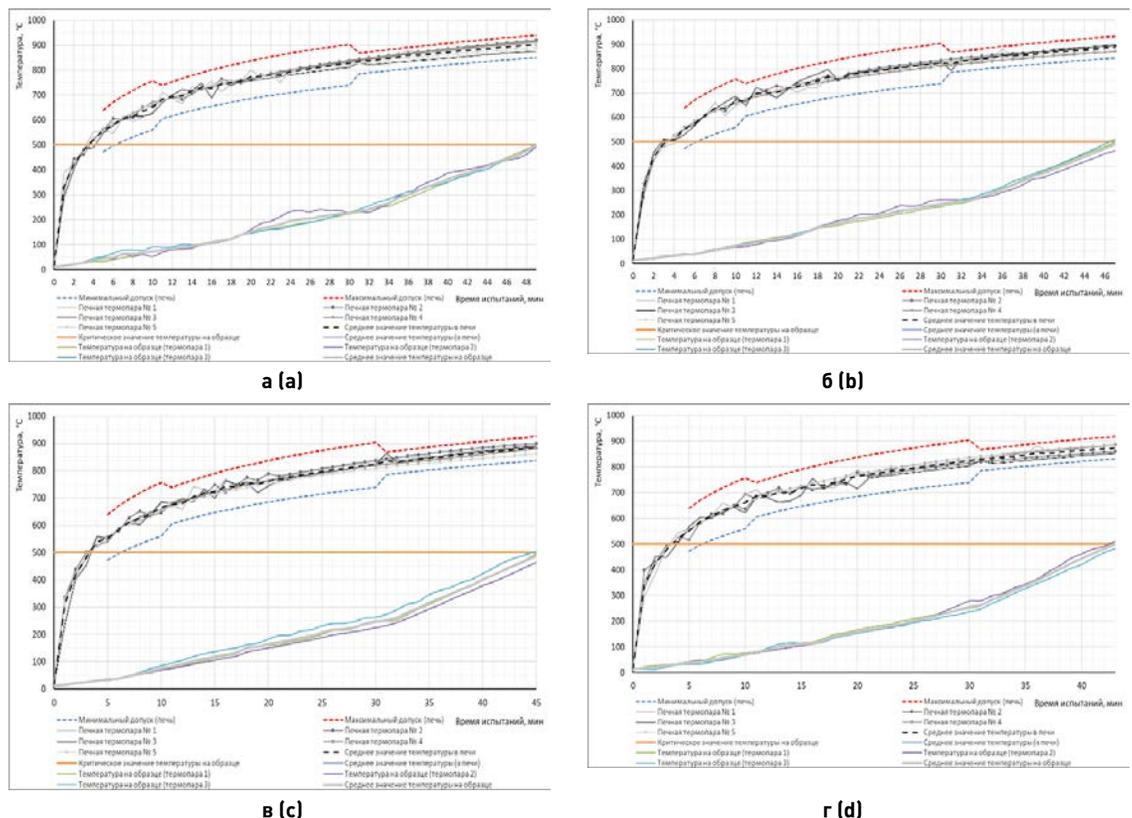
Анализ идентификационных термоаналитических характеристик огнезащитного покрытия контрольного образца и состаренных образцов в температурном интервале испытаний показал следующее:

- подобие сравниваемых термоаналитических кривых во всем температурном интервале сравнения (рис. 10);
- при сравнении значимых идентификационных характеристик исследованных огнезащитных покрытий с использованием экспериментально полученных и теоретически рассчитанных статистических критериев существенных расхождений не обнаружено.

На основании вышеизложенного можно заключить, что по термоаналитическим характеристикам огнезащитные свойства покрытия контрольного и состаренных образцов идентичны.

### Оценка сохранности огнезащитной эффективности

Зависимости изменения температуры в печи и на образцах при испытаниях по ГОСТ Р 53295-2009 [9] представлены на рис. 11.



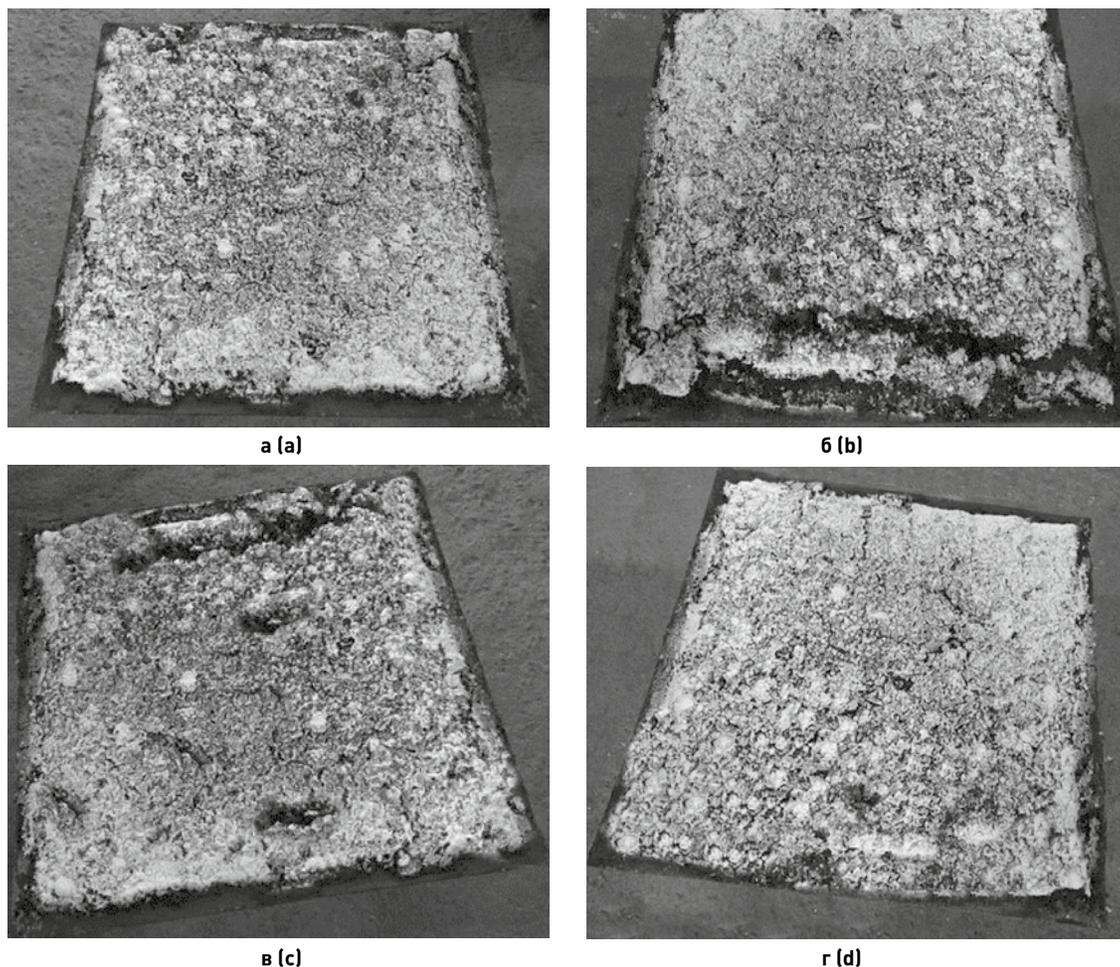
**Рис. 11.** Изменение температуры в печи и на образце в процессе испытания:  
 а – контрольный без старения; б – после 45 циклов старения; в – после 134 циклов старения;  
 г – после 224 циклов старения

**Fig. 11.** Temperature change in the furnace and on the sample during the test:  
 a – control without aging; b – after 45 aging cycles; c – after 134 aging cycles; d – after 224 aging cycles

Внешний вид образцов после огневых испытаний представлен на рис. 12.

По результатам испытаний установлено, что время достижения критической температуры 500 °С на образцах составило: контрольный без старения – 49 мин; после 45 циклов старения – 47 мин; после 134 циклов старения – 45 мин; после 224 циклов старения – 43 мин.

При анализе полученных данных установлено, что огнезащитная эффективность с увеличением количества циклов искусственного старения несколько снизилась и составила 12% в сторону уменьшения от контрольного образца при 224 циклах. То есть можно прогнозировать сохранение огнезащитной эффективности в течение 25 лет эксплуатации покрытия.



**Рис. 12.** Образцы после проведения огневых испытаний:

а – контрольный без старения; б – после 45 циклов старения; в – после 134 циклов старения;  
г – после 224 циклов старения

**Fig. 12.** Samples after fire tests:

a – control without aging; b – after 45 aging cycles; c – after 134 aging cycles; d – after 224 aging cycles

## Заключение

Прогнозируемый срок службы испытанной системы покрытия на основе антикоррозионной грунтовки «ДЕКОПОКС-ФАСТ», атмосферостойкой огнезащитной краски «ДЕКО-ТЕРМ-ХРОМ-Р» и двухкомпонентной полиуретановой грунт-эмали «ДЕКОПУР-ФЛЕКС» в условиях открытой промышленной атмосферы (ХЛ1, УХЛ1) с сохранением огнезащитной эффективности при условии соблюдения всех требований технологического процесса получения покрытия составляет не менее 25 лет.

## Список литературы

1. Технический регламент Евразийского экономического союза «О требованиях к средствам обеспечения пожарной безопасности и пожаротушения» (ТР ЕАЭС 043/2017) [интернет]. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293744/4293744691.pdf>.
2. Комарова М.А., Гришин И.А., Шалабин М.В., Мельников Н.О. Разработка методов испытаний сохранения свойств 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)
3. 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: Стандартиформ; 2010.
4. ГОСТ 16523-97. Прокат тонколистовой из углеродистой стали качественной и обыкновенного качества общего назначения. Технические условия. Москва: Стандартиформ; 2008.
5. ГОСТ 9045-93. Прокат тонколистовой холоднокатаный из низкоуглеродистой качественной стали для холодной штамповки. Технические условия. Минск: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации; 1996.
6. ГОСТ 28379-89. Шпатлевки ЭП-0010 и ЭП-0020. Технические условия. Москва: Стандартиформ; 2006.
7. 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: Стандартиформ; 2018.
8. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. Москва: Стандартиформ; 2011.
9. ГОСТ Р 53295-2009. Средства огнезащиты для стальных конструкций. Общие требования. Метод определения огнезащитной эффективности. Москва: Стандартиформ; 2009.
10. ГОСТ 9.407-2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. Москва: Стандартиформ; 2015.
11. ГОСТ 30247.0-94. Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования. Москва: Издательство стандартов, 2003.

## References

1. Technical Regulations of the Eurasian Economic Union “On requirements for fire safety and fire extinguishing equipment” (TR EAEU 043/2017) [internet]. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293744/4293744691.pdf>. [In Russian].
2. 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)

3. 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).
4. State Standard 16523-97. Rolled sheets from quality and ordinary carbon steel for general purposes. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2008. (In Russian).
5. State Standard 9045-93. Cold-rolled thin sheets of low-carbon steel for cold stamping. Specifications. Minsk: Euro-Asian Council for standardization, metrology and certification; 1996. (In Russian).
6. State Standard 28379-89. Putties ЭП-0010 and ЭП-0020. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2006. (In Russian).
7. 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).
8. 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).
9. 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).
10. State Standard 9.407-2015. Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. Method of appearance rating. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
11. State Standard 30247.0-94. Elements of building constructions. Fire-resistance test methods. General requirements. Moscow: Publishing house of standards; 2003. (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

**María 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

**Никита Олегович Мельников**<sup>✉</sup>, 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**<sup>✉</sup>, 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, D.I. Mendeleev Russian University of Chemical Technology, Moscow

e-mail: no.melnikov@yandex.ru

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

**Mikhail V. Shalabin**, Postgraduate 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

**Михаил Иванович Ведяков**, инженер отдела металлических конструкций, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; студент 5-го курса Института гидротехнического и энергетического строительства, НИУ МГСУ, Москва

**Mikhail I. Vedyakov**, Engineer of the Metal structures Department, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction; 5th year student of the Institute of Hydraulic Engineering and Power Plant Construction, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.32:620.193.21

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-47-55](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-47-55)

EDN: TLZRAP

# ЗАЩИТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ В БИОЛОГИЧЕСКИ АГРЕССИВНЫХ СРЕДАХ

Н.К. РОЗЕНТАЛЬ<sup>1</sup>✉, д-р техн. наук

Г.В. ЧЕХНИЙ<sup>2</sup>, канд. техн. наук

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

<sup>2</sup> 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.** Рассмотрены вопросы коррозии бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений в биологически активных средах с указанием мер защиты. Представленные материалы являются результатом многолетних обследований большого числа железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения и натурных коррозионных испытаний бетонных образцов в биологически активных коррозионных средах.

**Цель.** Обобщение результатов выполненных работ в области коррозии и защиты железобетона в агрессивных биологических средах.

**Материалы и методы.** Исследовалось состояние железобетона конструкций и бетонных образцов, изготовленных со средствами защиты от конкретных агрессивных сред, находившихся длительное время в биологически активных средах. Основной метод исследований – изучение состояния бетона после длительного воздействия агрессивных сред.

**Результаты.** На основании результатов изучения состояния бетона в образцах и конструкциях изложены методы защиты бетона от воздействия: корней растений на плиты перекрытий железобетонных резервуаров питьевой воды; продуктов жизнедеятельности животных на полы животноводческих помещений; моллюсков-камнеточцев на морские сооружения; тионовых бактерий на сооружения водоотведения и очистки; плесневых грибов на промышленные и жилые помещения.

**Выводы.** Защита железобетонных конструкций в биологически активных средах должна назначаться на основании изучения их особенностей, механизмов коррозионных процессов в бетоне при их воздействии, а также анализа состояния конструкций в условиях длительного воздействия биологических сред.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, биологические коррозионно-активные среды, биологическая коррозия, моллюски-камнеточцы, тионовые бактерии, морские обрастатели, плесневые грибы

**Для цитирования:** Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Защита железобетонных конструкций в биологически агрессивных средах. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):47–55. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-47-55](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-47-55)

## Вклад авторов

Розенталь Н.К. – научное руководство, участие в обследованиях, написание статьи.

Чехний Г.В. – участие в обследованиях, написание статьи.

## Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.06.2024

Поступила после рецензирования 02.08.2024

Принята к публикации 08.08.2024

# PROTECTION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES IN BIOLOGICALLY AGGRESSIVE ENVIRONMENTS

N.K. ROZENTAL<sup>1,✉</sup>, Dr. Sci. (Engineering)  
G.V. CHEKHNI<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

<sup>1</sup> JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, Moscow, 109428, Russian Federation

<sup>2</sup> 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 corrosion of concrete and reinforced concrete structures of buildings and facilities in biologically aggressive environments is considered and protective measures are indicated. All the presented materials are resulted from long-term surveys of numerous reinforced concrete structures of buildings and structures for various purposes along with full-scale corrosion tests of concrete samples in biologically aggressive corrosive environments.

*Aim.* To summarize the results of the performed work on the corrosion and protection of reinforced concrete in biologically aggressive environments.

*Materials and methods.* The reinforced concrete of structures and concrete samples prepared with means of protection against particular aggressive environments were studied, after they had been in biologically aggressive environments for a long period of time. The main research method is the study of concrete condition after prolonged exposure to aggressive environments.

*Results.* From the results of the study are outlined the methods of concrete protection from the following exposures: plant roots on the floor slabs of reinforced concrete drinking water tanks; animal life products on the floors of livestock facilities; stone-borers on marine facilities; thionic bacteria on water disposal and treatment facilities; mold fungi on industrial and residential premises.

*Conclusion.* Reinforced concrete structures in biologically aggressive environments should be protected through studying their peculiarities, corrosion mechanisms, as well as analyzing the condition of structures under prolonged exposure to biological environments.

**Keywords:** concrete, reinforced concrete, biologically aggressive environment, corrosion, stone-borers, thionic bacteria, marine fouling, mold fungi

**For citation:** Rozental N.K., Chekhni G.V. Protection of reinforced concrete structures in biologically aggressive environments. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):47–55. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-47-55](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-47-55)

## Authors contribution statement

Rozental N.K. – scientific guidance, experimental study, writing the manuscript.  
Chekhni G.V. – experimental study, writing the manuscript.

## Funding

No funding support was obtained for the research.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

*Received 20.06.2024*

*Revised 02.08.2024*

*Accepted 08.08.2024*

Биологически активные среды, в которых железобетонные конструкции подвергаются агрессивным воздействиям, весьма разнообразны. Одна из ранних работ, привлекавшая внимание специалистов, занимающихся проблемой коррозии бетона в биологически активных средах, появилась в печати в 1978 г. [1]. В дальнейшем исследования биокоррозии бетона получили значительное развитие [2]. Работы выполнялись при координации Научного совета по биоповреждениям АН СССР. Выполненные НИИЖБ обследования состояния железобетонных конструкций в различных биологически активных средах позволяют выделить те из них, которые вызывают наибольшие повреждения железобетонных конструкций. К ним следует отнести среды, в которых конструкции механически повреждаются живыми организмами (животные, растения) и вследствие химических взаимодействий с продуктами жизнедеятельности животных, грибов и бактерий. Бетон не является питательной средой для микроорганизмов, но загрязнение исходных материалов и бетона органическими веществами создает для развития бактерий благоприятную среду.

Корни растений. Повреждения такого рода наблюдаются в заглубленных (подземных) резервуарах питьевой воды, прошедшей предусмотренную технологией очистку на станциях водоподготовки. Корни из грунта, находящегося на перекрытии, проникают через трещины в бетоне. Давление корней расширяет трещины. Фильтрующая вода растворяет известь цементного камня в бетоне. Ширина трещин увеличивается. В результате в очищенную, готовую к передаче потребителю воду попадает неочищенная грунтовая вода. Со временем ширина трещин увеличивается, а поток неочищенной воды возрастает.

Метод защиты железобетонных конструкций от разрушающего действия корней растений состоит в регулярном осмотре перекрытий и выявлении повреждений, своевременном ремонте выявленных мест протечек грунтовой воды. Ремонт выполняется путем расчистки и удаления поврежденного бетона, нагнетания в трещины плотных мелкозернистых цементно-песчаных растворов или органических защитных составов. В работе [3] рассмотрен случай образования трещин в бетоне днища и стен резервуаров, возникающих вследствие осадки и других деформаций резервуаров питьевой воды. Заделку предлагается выполнять эластичными гидроизоляционными материалами. Подобный ремонт выполняется на поврежденных корнями кустов и деревьев кровлях старых зданий, длительное время не находившихся в эксплуатации.

В сельскохозяйственных зданиях (коровниках, свинарниках) наибольшему повреждению подвергаются полы. Одновременное воздействие копыт и агрессивных выделений животных вызывает разрушение бетонных полов. Особенно агрессивна к бетону среда свинарников. Нам известен определенный положительный опыт защиты полов свинарников на Кубе. Защита бетона выполнялась механически прочными и коррозионностойкими эпоксидными покрытиями.

В.М. Москвиным были обследованы причалы в Черном море, разрушенные (взорванные) в период Великой Отечественной войны. Рассматривая вопросы биологической коррозии, он установил, что обрастание бетона морскими растениями практически не разрушало бетон. Повреждения вызывали живые организмы – различного рода моллюски, дыхание которых повышало на контакте с бетоном концентрацию растворенной углекислоты и тем способствовало растворению цементного камня в морской воде.

Железобетонные конструкции могут повреждаться в море моллюсками-камнеточцами. Этот вид повреждений характерен для стран с жарким климатом. Такое повреждение

наблюдалось нами на Кубе. Обсуждалась возможность строительства морского аквариума. Предполагалось построить его непосредственно в море. В таком аквариуме посетители могли бы находиться ниже уровня воды в железобетонных коридорах с большими остекленными окнами и наблюдать за жизнью морских обитателей в естественной среде. От открытого моря аквариум был бы огражден металлической сеткой, что не позволило бы обитателям аквариума покидать его территорию.

В порядке подготовки к строительству в одном из морских портов была поднята свая, сломанная при строительстве причала и пролежавшая на дне около 20 лет. Сваю распилили и обнаружили прямолинейные цилиндрические каналы, созданные моллюсками-камнеточцами. Каналы имели вход со стороны моря диаметром 1–2 мм. Через это отверстие личинки моллюска проникали в бетон и, продвигаясь вглубь, постепенно обращались в двусторчатых моллюсков. Через оставшееся отверстие моллюск мог обменивать находящуюся в скважине воду, что позволяло ему дышать растворенным в воде кислородом и питаться микроскопическими морскими обитателями. С удалением вглубь от поверхности сваи диаметр скважины увеличивался до 10–12 мм. Скважины имели длину 10–15 см. Сообщается, что длина скважины может достигать 30 см. На поперечном срезе бетон имел вид ломтика пористого сыра. Моллюск постепенно увеличивал длину скважины, выделяя при дыхании углекислый газ, который растворял цементный камень и карбонатный заполнитель. Движение створок моллюска при дыхании оказывало истирающее действие и создавало условие для продвижения моллюска вглубь бетона.

Подобное повреждение бетона возможно для регионов с жарким климатом, где имеются условия для существования подобных моллюсков, а заполнитель для бетона сложен карбонатными породами ввиду отсутствия твердых, нерастворимых углекислотой изверженных пород, необходимых для производства щебня. В бетоне с таким заполнителем перемещение моллюска прекращается, как только он достигнет плотного, не поддающегося растворению углекислотой зерна заполнителя.

Скважины, созданные моллюсками в скалах, сложенных карбонатными породами, можно видеть в Крыму. Находятся они на значительной высоте от уровня моря, что свидетельствует об изменении уровня моря или о подъеме суши.

Применение твердых изверженных пород при изготовлении бетона решает указанную проблему. Можно полагать, что подобная проблема характерна главным образом для приморских и малых островных государств, где отсутствуют твердые изверженные породы, а для изготовления заполнителей имеются лишь нестойкие к указанному воздействию карбонатные отложения.

В России в Заполярье (Кольский полуостров), где в морском строительстве применяются бетоны с заполнителями из твердых изверженных пород, подобные повреждения бетона не наблюдались. Распространенные там моллюски способны повредить бетон с заполнителями из изверженных твердых пород лишь в тонком наружном слое цементного камня до первого зерна крупного заполнителя, что не может создать проблем для железобетонных конструкций. Возможно лишь обрастание поверхности подводной части сооружения водорослями и моллюсками.

В теплых морях обрастание подводных конструкций может достигать 100 кг/м<sup>2</sup>, что заметно увеличит нагрузку на несущие конструкции. В холодных северных морях обрастание значительно меньше. Однако обрастание бетона растениями и моллюсками создает проблему

эксплуатации водоводов морской воды. Обрастание внутренней поверхности труб уменьшает пропускную способность водоводов.

С негативным влиянием обрастания поверхности в море строители встретились при возведении Кислогубской приливной электростанции в заливе Баренцева моря. Обрастание внутренней поверхности труб, подводящих морскую воду к турбогенераторам, могло затруднить подвод воды и существенно повлиять на мощность станции. Возникла необходимость защиты турбинного водовода от биологического обрастания. Строителями было реализовано оригинальное решение [4].

Создана установка, забирающая морскую воду насосом. Воду пропускают через электролизер, где происходит разложение морских солей хлоридов с образованием активного хлора (хлорноватистая кислота и гипохлорит-ионы, обладающие сильным бактерицидным действием). Содержащая активный хлор морская вода периодически подается в объем водовода. Производительность установки по хлору, по данным экологов, достаточна для полной защиты водовода и не создает экологических проблем для обитателей отделенного от моря водоема. При концентрации хлора 1,5–2,0 мг/л он не уничтожает личинки, а лишь не позволяет им закрепляться на поверхности трубопровода. На выходе из водовода хлор не обнаруживается. Исследования экологов показали, что такой метод защиты трубопроводов не оказывает влияния на обитателей отделенной от моря части залива.

К числу химических веществ, выделяемых бактериями, относится сероводород, обращаемый тионовыми бактериями в серную кислоту, вызывающую коррозию бетона и стальной арматуры.

Сероводородная среда, образующаяся в трубопроводах систем канализации сточных вод, является агрессивной для железобетонных конструкций [5]. Сотрудники НИИЖБ выполнили большое число обследований состояния канализационных трубопроводов в различных городах России. Как правило, заказы на обследования поступали от местных водоканалов в связи с обрушением туннелей. Коррозия железобетонных трубопроводов при воздействии сероводорода протекает весьма интенсивно. В работе [6] оценивали скорость разрушения бетона, погруженного в сероводородную воду и в газовую сероводородную среду. В газовой среде процесс коррозии бетона развивался с большей скоростью, чем в жидкой. Аналогичную картину мы видим в реальных канализационных коллекторах. Как правило, повреждение бетона происходит в сводовой части трубопровода, не подвергающейся прямому контакту с жидкими стоками.

Механизм повреждения железобетонных труб коллекторов сточных вод состоит в следующем. В лотковой части трубопровода образуется органический осадок. В толще осадка при низком содержании кислорода создаются идеальные условия для размножения анаэробных бактерий. Такие бактерии в процессе своей жизнедеятельности не требуют присутствия кислорода. Питательной средой для анаэробных бактерий служат органические вещества, белки, сульфированные моющие средства и другие серосодержащие вещества. Тионовые анаэробные бактерии разрушают органические вещества, содержащие серу, и в условиях дефицита кислорода выделяют сероводород. Сероводород поступает в парогазовую среду трубопровода, растворяется в конденсате на поверхности стенок и свода сооружения и становится питательной средой для аэробных бактерий, развивающихся в присутствии кислорода. Продуктом жизнедеятельности аэробных бактерий является серная кислота. Конденсат на стенках и своде трубопровода становится сильноагрессивной средой для бетона. Происходит разрушение бетона в своде трубопровода, развивается коррозия стальной

арматуры. Процесс заканчивается обрушением свода. Случаев обрушения железобетонных трубопроводов большое количество. Особенно много таких обрушений наблюдалось в трубопроводах, транспортирующих стоки кожевенных заводов, заводов по производству безалкогольных напитков и других предприятий, выпускающих органические продукты. Питательной средой для анаэробных бактерий служат и имеющиеся в воде моющие средства, которые в большинстве содержат сульфированные продукты. Наблюдаются обрушения коллекторов, транспортирующих воду, содержащую моющие средства, имеющие в своем составе серу, используемую в жизнедеятельности анаэробных бактерий. Скорость разрушения бетона достигает 1 см в год [7].

Для оценки проницаемости цементно-песчаных растворов для бактериальных клеток различной формы и величины предложен условный показатель – коэффициент инфицирования, который можно использовать для прогнозирования стойкости материала в биологически агрессивных средах [8].

В большинстве случаев ремонт сводился к вскрытию поврежденного участка трубопровода, установке металлического короба и его обетонированию. Поскольку при этом состав сточных вод не менялся, через какое-то время происходило обрушение трубопровода на соседних участках. Повреждение канализационных трубопроводов наблюдалось нами во многих городах.

В качестве меры защиты от агрессивного действия тионовых бактерий на бетон профессором В. М. Васильевым в Санкт-Петербурге предложены системы аэрации стоков и вентиляции воздушного пространства коллекторов.

В НИИЖБ д.т.н. С. С. Каприеловым с сотрудниками предложена конструкция коррозионно-стойких железобетонных труб из высокопрочного бетона с вкладышем из кислотостойкого полимера. Вкладыш устанавливался в форму перед бетонированием трубы на заводе ЖБИ. Получалась коррозионно-стойкая труба.

В настоящее время в Москве происходит массовая замена железобетонных труб в канализационных системах на трубы из коррозионно-стойких полимеров. Можно ожидать, что такие трубы будут служить без аварий многие годы.

Чем выше растворимость или увеличение объема продуктов взаимодействия кислоты с силикатами и алюминатами цементного камня, тем выше агрессивность среды. Помимо сильных минеральных кислот (серной, азотной), агрессивностью к бетону обладают и многие органические кислоты: уксусная, молочная, лимонная и другие, образующие с гидроксидом кальция хорошо растворимые соли, что ставит эти кислоты в один ряд с агрессивными к бетону средами. Например, растворимость кальциевой соли молочной кислоты равняется 54 г/л. На заводах по переработке молока при проливах молочной продукции и его скисании образующаяся молочная кислота разрушает бетонные полы.

В период перестройки в крупных городах, в том числе в Москве, возникавшие в большом количестве малые предприятия занимали ранее не приспособленные для офисов и магазинов и не использованные как помещения для длительного нахождения в них людей подвалы в старых домах. Нередко это были влажные помещения, стены которых были заражены плесневыми грибами. Сотрудники таких предприятий жаловались на нездоровую среду этих помещений. Для приведения помещений в нормативное состояние давались рекомендации по удалению зараженной грибами штукатурки, осушению и гидроизоляции помещений, использованию при повторном нанесении штукатурки добавок биоцидов.

Цементные бетоны и штукатурки разрушаются плесневыми грибами. При микроскопическом анализе отобранных из поврежденной цементной штукатурки и бетона образцов обнаруживаются плесневые грибы видов *Penicillium*, *Cladosporium*, *Aspergillus*, *Mucor*, *Candida* и др. Указать точно количество видов плесневых грибов невозможно. Специалисты называют сотни видов. Плесневые грибы повреждают в первую очередь пористые штукатурки и бетоны. У людей, находящихся в зараженных помещениях, споры грибов вызывают многочисленные заболевания, в том числе болезни дыхательных путей. У жильцов и работающих в зараженных помещениях людей при анализе обнаруживали в крови споры плесневых грибов. Заражение бетона и штукатурки грибами обнаруживалось в первую очередь в подвалах и помещениях с влажным режимом работы. Сотрудники НИИЖБ выполнили обследования на грибковые повреждения конструкций большого числа жилых домов, общественных, спортивных, медицинских, музейных зданий и помещений. В большинстве случаев поражения железобетонных конструкций грибами обнаружены в зданиях с большим сроком эксплуатации. Но были здания и сооружения с еще не законченным строительством. Предполагается, что споры грибов были внесены в бетон и штукатурку с исходными материалами или конструкции были загрязнены в период строительства. Пробы бетона и штукатурки при необходимости передавали для анализа в медицинские организации. Заражение плесневыми грибами наблюдается в первую очередь в помещениях с влажным режимом эксплуатации (промышленные здания и помещения с выделением пара технологическими установками, ванны и туалетные помещения жилых зданий, при наличии конденсата на промерзающих стенах и т. п.). Характерным признаком повреждения является шелушение штукатурки [9]. На поверхности конструкций плесневые грибы могут иметь вид легкого бесцветного или окрашенного налета. Плесневые грибы могут проникать в штукатурку на значительную глубину.

Грибы могут иметь различную форму. Например, при обследовании фундамента небольшого дома, построенного в 1892 г. на берегу Оки, под гидроизоляцией, выполненной из бересты, были обнаружены грибы в виде толстых шнуров диаметром до 1–2 см и длиной в несколько метров.

Повреждения плесневыми грибами наблюдались в зданиях и сооружениях не только в средней полосе европейской части России, но и в северных районах, где при низких зимних температурах стены нередко промерзают и на поверхности со стороны помещения конденсируется влага. Нередко для сбережения тепла помещения недостаточно проветривают, создаются условия для появления конденсата, увлажнения бетона и появления плесени. Специалисты насчитывают сотни видов плесневых грибов. Споры многих из них вызывают многочисленные виды заболеваний человека. Меры предупреждения появления плесени предусматривают утепление наружных ограждающих конструкций зданий, поддержание относительной влажности в пределах установленных гигиенических норм и обработку поверхности конструкций биоцидами [10–12].

Специалисты не рекомендуют самостоятельно бороться с плесенью. Это опасно, велика возможность заражения. Существуют специализированные организации, имеющие необходимые препараты и оборудование.

## Заключение

Защита железобетонных конструкций в биологически активных средах должна назначаться на основе результатов тщательного изучения особенностей биологически активных сред, коррозионных процессов, происходящих в бетоне конструкций, анализа состояния конструкций, подвергавшихся воздействию названных сред. В настоящей статье приведены некоторые результаты обследований зданий и сооружений с биологически активными средами и рекомендации по защите конструкций, выполненных из цементных растворов и бетонов. Ввиду большого разнообразия биологических сред и недостаточной изученности их воздействий на строительные конструкции исследования в данном направлении необходимо расширять.

## Список литературы

1. Чуйко А.В. Органогенная коррозия. Саратов: Изд-во Сарат. гос. унив.; 1978.
2. Старцев С.А. Биоповреждение строительных конструкций как фактор, снижающий долговечность зданий и сооружений. В: Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве: Материалы междунар. конф., 10-12 окт. 2007 г. Санкт-Петербург; 2007, с. 20-24.
3. Латыпов В.М., Анваров Б.М., Латыпова Т.В. Долговечность и способы ремонта железобетона в резервуарах чистой воды. В: Проблемы прочности бетона и железобетона: материалы науч.-техн. конф. Уфа: Уфимский государственный нефтяной технический университет; 2011, с. 271-274.
4. Усачев И.Н. Морская энергетика. Приливные электростанции и морские энергетические установки. Санкт-Петербург: Изд-во АО «ВНИИГ им Б.Е. Веденеева»; 2022.
5. Дрозд Г.Я., Матвиенко В.А., Губарь В.Н. Биоповреждения бетона сооружений биологической очистки сточных вод. В: Биоповреждения и методы оценки биостойкости материалов. Москва; 1988, с. 91-96.
6. Читаишвили Т.Г., Гудеджиани Э.Н. Тионовые бактерии как фактор коррозии бетонных сооружений, омываемых сероводородными минерализованными водами. В: Биоповреждения в строительстве. Москва: Стройиздат; 1984.
7. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Стойкость бетонов в газовой среде коллекторов сточных вод. Бетон и железобетон. 2002;(5):23-25.
8. Рожанская А.М., Гончаров В.В., Теплицкая Т.В., Андреев Е.И. Инфицирование капиллярно-пористых материалов микроорганизмами. Доклады АН УССР. 1988;(12):60-62.
9. Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Мельникова А.И. Коррозия цементных материалов, вызванная воздействием грибов. Бетон и железобетон. 2000;(6):23-26.
10. Иванов Ф.М., Рогинская Е.Л., Серебряник В.А., Гончаров В.В. Бицидные растворы и бетоны. Бетон и железобетон. 1989;(4):9-10.
11. Антонов В.Б. Влияние биоповреждений зданий на здоровье человека. В: Проблемы долговечности зданий и сооружений в современном строительстве: Материалы междунар. конф., 10-12 окт. 2007 г. Санкт-Петербург; 2007, с. 137-142.
12. Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Вопросы коррозионной стойкости при воздействии биологически активных сред. В: Бетон и железобетон – взгляд в будущее: науч. тр. III Всероссийской (II Международной) конф. по бетону и железобетону, Москва, 12-16 мая 2014 г. Т. 3. Москва; 2014, с. 367-376.

## References

1. Chuiko A.V. Organogenic corrosion. Saratov: Publishing house of Saratov State University; 1978. (In Russian).
2. Startsev S.A. Bio-damage of building structures as a factor reducing the durability of buildings and structures. In: Problems of durability of buildings and structures in modern construction: Materials of the international conference, October 10-12, 2007. Saint Petersburg; 2007, pp. 20-24. (In Russian).

3. *Latypov V.M., Anvarov B.M., Latypova T.V.* Durability and methods of repair of reinforced concrete in clean water tanks. Problems of strength of concrete and reinforced concrete: Materials of the scientific and technical conference. Ufa: Ufa State Petroleum Technical University; 2011, pp. 271–274. (In Russian).
4. *Usachev I.N.* Marine energy. Tidal power plants and marine power plants. Saint Petersburg: Publishing house of JSC VNIIG named after B.E. Vedeneev; 2022. (In Russian).
5. *Drozd G.Ya., Matvienko V.A., Gubar V.N.* Bio-damages of concrete of biological wastewater treatment facilities. In: Bio-damages and methods for assessing the biostability of materials. Moscow; 1988, pp. 91–96. (In Russian).
6. *Chitaishvili T.G., Gudegiani E.N.* Thionic bacteria as a corrosion factor of concrete structures washed by hydrogen sulfide mineralized waters. In: Bio-damages in construction. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1984. (In Russian).
7. *Rozental N.K., Chekhniy G.V.* Resistance of concrete in the gas environment of wastewater collectors. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2002;(5):23–25. (In Russian).
8. *Rozhanskaya A.M., Goncharov V.V., Teplitskaya T.V., Andreyuk E.I.* Infection of capillary-porous materials by microorganisms. Doklady Akademii nauk Ukrainsskoi SSR [Reports of the Academy of Sciences of the Ukrainian SSR]. 1988;(12):60–62. (In Russian).
9. *Rozental N.K., Chekhniy G.V., Melnikova A.I.* Corrosion of cement materials caused by exposure to fungi. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2000;(6):23–26. (In Russian).
10. *Ivanov F.M., Roginskaya E.L., Serebryanyk V.A., Goncharov V.V.* Biocidal solutions and concretes. Beton i Zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 1989;(4):9–10. (In Russian).
11. *Antonov V.B.* The effect of biological damage to buildings on human health. In: Problems of durability of buildings and structures in modern construction: Materials of the international conference, October 10-12, 2007. Saint Petersburg; 2007, pp. 137–142. (In Russian).
12. *Rozental N.K., Chekhniy G.V.* Issues of corrosion resistance under the influence of biologically active media. In: Concrete and reinforced concrete – glance at future: Scientific papers of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete: Moscow, May 12-16, 2014. Vol. 3. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2014, pp. 367–376. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Николай Константинович Розенталь** , д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы», АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: rosental08@mail.ru

**Nikolai K. Rozental** , Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: rosental08@mail.ru

**Галина Васильевна Чехний**, канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: chehniy@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-97

**Galina V. Chekhniy**, Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, 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: chehniy@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-76-97

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.139

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)

EDN: RSJSVQ

# РАСЧЕТ ГЛУБИНЫ СЕЗОННОГО ПРОМЕРЗАНИЯ ГРУНТОВ ИНЖЕНЕРНЫМИ И ЧИСЛЕННЫМИ МЕТОДАМИ

А.Г. АЛЕКСЕЕВ<sup>1,2</sup>, д-р техн. наук

<sup>1</sup> 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

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

## Аннотация

**Введение.** Суровые климатические условия Российской Федерации определяют сезонное промерзание грунта и развитие криогенных процессов, негативно влияющих на фундаменты и заглубленные сооружения. Величина сил морозного пучения существенно зависит от глубины промерзания грунта, что делает оценку глубины промерзания грунта весьма актуальной.

**Цель.** Расчет и оценка глубины сезонного промерзания грунтов инженерными и численными методами.

**Материалы и методы.** Выполнялись расчеты глубины промерзания грунта по двум площадкам, сложным супесями и суглинками. Инженерные расчеты выполнялись по четырем методикам, изложенным в следующих нормативных документах: «Рекомендации по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов», «Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах», «Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов», «Рекомендации по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов», а численные – в программных комплексах Frost 3D и Борей 3D. Экспериментальные площадки расположены в Тымовском районе Сахалинской области, где прокладывался трубопровод Сахалин-2.

**Результаты.** Результаты исследований показали, что инженерные методики дают завышенные результаты при использовании в оценке искомой глубины промерзания грунта большого спектра климатических и грунтовых параметров: температура воздуха, высота и плотность снежного покрова, скорость ветра, коэффициенты конвективного теплообмена, суммарная солнечная радиация, альbedo поверхности, максимальная упругость водяных паров и др. В то же время использование формулы Стефана с ограниченным набором входных параметров дает близкие по значениям результаты. Численные методы показали близкие результаты между собой, но на 32–47% больше, чем результаты инженерных расчетов при оголенной поверхности грунта.

**Выводы.** Предлагается проведение научных исследований динамики изменения глубины промерзания грунта в полевых условиях и сопоставление с результатами инженерных и численных расчетов для совершенствования данных методик.

**Ключевые слова:** глубина сезонного промерзания грунта, инженерные и численные методы расчета, высота снежного покрова, климатические параметры

**Для цитирования:** Алексеев А.Г. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов инженерными и численными методами. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):56–82. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)

## Вклад автора

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

**Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов**

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.06.2024

Поступила после рецензирования 18.07.2024

Принята к публикации 25.07.2024

## CALCULATION OF SEASONAL SOIL FREEZING DEPTH BY ENGINEERING AND NUMERICAL METHODS

A.G. ALEKSEEV<sup>1,2</sup>, Dr. Sci. (Engineering)

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

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

**Abstract**

*Introduction.* Provided by severe climatic conditions in the Russian Federation, seasonal soil freezing and emerging cryogenic processes cause frost heaving that negatively affect foundations and buried structures. As the magnitude of frost heaving forces significantly depends on the soil freezing depth, the assessment of soil freezing depth becomes very relevant.

*Aim.* Calculation and estimation of the depth of seasonal soil freezing by engineering and numerical methods.

*Materials and methods.* Calculations of soil freezing depth were performed for two sites composed of sandy loam and loam. Engineering calculations were performed according to four methods set forth in the normative documents, namely *Recommendations on Thermal Engineering Calculations and Pipeline Laying in Areas with Deep Seasonal Soil Freezing*, *Handbook on Construction on Permafrost Soils*, *Recommendations on Accounting and Prevention of Deformations and Forces of Soil Frost Heaving*, *Recommendations on Forecasting the Thermal State of Permafrost Soils*. Numerical calculations were performed in the Frost 3D and Borey 3D software systems. The experimental sites are located in the Tymovsky district of Sakhalin Oblast, where the Sakhalin-2 pipeline was laid.

*Results.* The engineering methods for calculating the required depth of soil freezing give overestimated results when using a large range of climatic and soil parameters: air temperature, snow cover height and density, wind speed, convective heat transfer coefficients, total solar radiation, surface albedo, maximum elasticity of water vapor, etc. At the same time, the use of Stephan's formula with a limited set of input parameters gives results close in values. The numerical methods showed close results among themselves, though 32–47 % more than the results of engineering calculations at bare ground surface.

*Conclusions.* Research on the dynamics of soil freezing depth in field conditions is suggested to be carried out and compared with the results of engineering and numerical calculations to improve these methods.

**Keywords:** seasonal soil freezing depth, engineering and numerical calculation methods, snow cover height, climatic parameters

**For citation:** Alekseev A.G. Calculation of seasonal soil freezing depth by engineering and numerical methods. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):56–82. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-56-82](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-56-82)

### **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 20.06.2024*

*Revised 18.07.2024*

*Accepted 25.07.2024*

Территория Российской Федерации содержит различные климатические и геологические зоны, характеризующиеся различными свойствами, но, несмотря на это, практически вся подвержена сезонному промерзанию грунта. Промерзание грунта вызывает развитие морозного пучения влажных песчаных и глинистых грунтов, приводя к деформированию поверхности грунта и сооружений, расположенных в промерзающем грунте. Прогнозирование глубины и скорости промерзания грунта в условиях изменения климата и неоднородности грунтов является важной научно-практической задачей [1–12].

Имеющиеся на сегодня инженерные методы нашли отражение в нормативной документации как федерального [13, 14], так и отраслевого уровня [15–18], кроме того, разработаны и успешно применяются несколько российских программных комплексов, в меньшей степени – зарубежных [1]. На глубину промерзания влияют факторы климатического направления (температура воздуха, высота и плотность снежного покрова, скорость ветра, коэффициенты конвективного теплообмена, суммарная солнечная радиация, альбеда поверхности, максимальная упругость водяных паров и др.), а также геологические параметры (тип грунта в разрезе, физические и теплофизические свойства грунта). Определение данных параметров вызывает трудности, что в конечном счете влияет на результат. Поэтому выбор эффективного метода оценки величины глубины промерзания, опирающийся на базовый, легко определяемый набор входных параметров, является актуальным вопросом.

Анализ эффективности определения сезонного промерзания грунтов выполнялся на основе расчетов по четырем инженерным методикам и в двух программных комплексах. Расчеты велись для Тымовского района Сахалинской области, где прокладывался трубопровод Сахалин-2. Выполнялись расчеты для оголенной поверхности и поверхности грунта, находящейся под слоем снега, для двух типов грунта: супеси текучей (ПК1181 и 1190) и суглинка мягкопластичного (ПК1185 и 1202+50).

Инженерный расчет глубины промерзания грунта под слоем снега велся по четырем источникам: «Рекомендации по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов» [15]; «Справочник по строительству на вечномёрзлых грунтах» [16]; «Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов» [17]; «Рекомендации по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов» [18], а также в двух программных комплексах – Frost 3D и Борей 3D.

# 1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Рекомендациям по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов» [15]

## 1.1. Расчеты для пикетов ПК1181 и 1190

### 1.1.1. Исходные данные

В связи с тем, что метеорологические данные наблюдений за период не менее 10 лет для данного района – Тымовского (Сахалинская область) отсутствуют, данные о температуре воздуха приняты по близлежащему району острова Сахалин – г. Кировское. Высота снежного покрова принята различной, для сравнительного анализа:  $h_c = 0; 0,14; 1,12$  и  $1,58$  м.

На данных пикетах ПК1181 и 1190 с поверхности залегают супеси текучие, имеющие следующие физические характеристики:  $W = 0,339$ ;  $W_1 = 0,286$ ;  $W_p = 0,232$ ;  $I_p = 5,4$ ;  $I_L > 1$ ;  $\rho = 1,66$  г/см<sup>3</sup>;  $\rho_d = 1,20$  г/см<sup>3</sup>;  $\rho_s = 2,69$  г/см<sup>3</sup>;  $e = 1,24$ ;  $S_r = 0,81$ .

Расчетные значения коэффициентов теплопроводности и объемной теплоемкости мерзлого и талого грунтов  $\lambda_p$ ,  $C_f$  и  $\lambda_{th}$ ,  $C_{th}$  принимались по [13] в зависимости от плотности минерального скелета грунта  $\rho_d$  и суммарной влажности грунта  $W_{tot}$ .

Суммарная влажность грунта  $W_{tot}$  для участков, где предусматривается вертикальная планировка местности согласно [15] п. 2.2.13 для суглинков и супесей, принималась равной  $W_{tot} \approx W_p$ .

Тогда для супеси при  $W_{tot} = W_p = 0,232$  и  $\rho_d = 1,20$  г/см<sup>3</sup> коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости равны:

для мерзлого грунта:  $\lambda_f = 1,80$  Вт/м °С =  $1,54$  ккал/мч °С;  $C_f = 2100$  кДж/м<sup>3</sup> °С =  $500$  ккал/м<sup>3</sup> °С;  
для талого грунта:  $\lambda_{th} = 1,71$  Вт/м °С =  $1,48$  ккал/мч °С;  $C_{th} = 2945$  кДж/м<sup>3</sup> °С =  $701$  ккал/м<sup>3</sup> °С.

Величина удельной теплоты замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта определяется в соответствии с [13] по формуле:

$$Z_v = Z_0 (W_{tot} - W_w) \rho_d, \quad (1)$$

где  $Z_0 = 3,35 \times 10^4$  Дж/н (80 ккал/кг) – скрытая теплота плавления льда (замерзания воды);

$\rho_d$  – плотность сухого грунта (скелета грунта), кг/м<sup>3</sup>;

$W_w$  – весовое содержание незамерзшей воды при данной температуре грунта, д. е. Приближенно  $W_w$  для незасоленного грунта можно принять равным:

$$W_w = K_n W_p, \quad (2)$$

где  $W_p$  – влажность на границе пластичности (раскатывания), д. е.;

$K_n$  – коэффициент, принимаемый по [13] в зависимости от числа пластичности грунта  $I_p$  и температуры грунта  $T$ , °С.

Температуру грунта можно определить следующим образом:

$$T = 0,4 T_{c3}, \quad (3)$$

где  $T_{c3}$  – среднезимняя температура воздуха (для г. Кировское по СНиП 23-01-99 «Строительная климатология» [19]  $T_{c3} = -13,9$  °С).

Тогда  $T = 0,4 T_{c3} = 0,4 \times (-13,9) = -5,56$  °С, по [13]  $K_n = 0,28$ .

$$W_w = K_n W_p = 0,28 \times 0,232 = 0,065.$$

Величина удельной теплоты замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта составила:

$$Z_v = Z_0 (W_{\text{лот}} - W_w) \rho_d = 3,35 \times 10^4 (0,232 - 0,065) \times 12000 = 6,7 \times 10^7 \text{ Дж/м}^3.$$

### 1.1.2. Методика расчета

Глубина сезонного промерзания грунта,  $H_M$ , определяется по формуле:

$$H_M = \frac{A}{K_a}, \tag{4}$$

где  $K_a$  – параметр, вычисляемый из выражения:

$$K_a = \sqrt{\frac{Z_v + C_f T_{\text{сз}}}{10^7 \lambda_f T_{\text{сз}}}}, \tag{5}$$

$A$  – коэффициент, определяемый [15] в зависимости от приведенной температуры  $\theta$  при значении  $\tau$ , равной максимальной продолжительности зимнего периода;

$$\theta = \frac{T_0}{T_0 + T_M} \beta. \tag{6}$$

Учитывая, что для рассматриваемых условий величина  $\tau = 6$  месяцев, то в соответствии с графиком [15] значения величины параметра  $A$  изменяются от 1,6 до 3,2, а величина приведенной температуры  $\theta$  – в пределах от 0 до 0,2. Таким образом по данным Рекомендациям [1] возможно рассчитать глубину промерзания грунта в пределах приведенных значений  $A$  и  $\theta$ . Это обстоятельство будет учтено в дальнейших расчетах.

$T_M$  – минимальная среднемесячная температура воздуха за срок наблюдений 10 лет (принимается со знаком плюс) СНиП 23-01-99 [19].

$\beta$  – поправочный коэффициент за влияние снежного покрова, определяемый по формуле:

$$\beta = \sqrt{1 + 2K_a S_c (1 + K_a S_c)}, \tag{7}$$

$T_0$  – среднегодовая температура грунта по среднеголетним значениям метеоданных, определяется по формуле:

$$T_0 = \frac{B}{12} \left( \Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{\text{th}}} \Omega_3 + 8,75 \times 10^{-4} \frac{S_c}{\lambda_{\text{th}}} \sqrt{Z_v \lambda_f |\Omega_3|} \right), \tag{8}$$

где  $B$  – коэффициент, учитывающий поверхностные условия. Для территорий застройки  $B = 1$ ; для участков с естественным растительным покровом  $B = 0,9$ .

$S_c$  – толщина слоя грунта в м, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению снежного покрова:

$$S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c}, \tag{9}$$

$h_c$  – средняя за зиму толщина снежного покрова в м;

$\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности снежного покрова согласно [15] принимается равным: при среднезимней толщине снежного покрова до 0,2 м – 0,25 Вт/мК; при среднезимней толщине снежного покрова до 0,4 м – 0,35 Вт/мК.

$\lambda_f$  – коэффициент теплопроводности грунта в мерзлом состоянии, ккал/м×ч×град, определяется по [13];

Для данных условий  $S_c$  будет равна:

$$\text{при } h_c^1 = 0,14 \text{ м, } S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,8 \frac{0,14}{0,25} = 1,0 \text{ м;}$$

$$\text{при } h_c^2 = 1,12 \text{ м, } S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,8 \frac{1,12}{0,35} = 5,76 \text{ м;}$$

$$\text{при } h_c^3 = 1,58 \text{ м, } S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,8 \frac{1,58}{0,35} = 8,12 \text{ м;}$$

$$\Omega_{\text{л}} = \sum T_{\text{вл}} + \frac{1}{\alpha_{\text{л}}} (\sum R_{\text{л}} - \sum E_{\text{л}}), \quad (10)$$

$$\Omega_{\text{з}} = \sum T_{\text{вз}} + \frac{1}{\alpha_{\text{з}}} (\sum R_{\text{з}} - \sum E_{\text{з}}), \quad (11)$$

$\sum T_{\text{вл}}$  и  $\sum T_{\text{вз}}$  – суммы среднемесячных температур воздуха соответственно за летний и зимний периоды, °С;

$\sum R_{\text{л}}$  и  $\sum R_{\text{з}}$  – суммы среднемесячных значений радиационного баланса соответственно за летний и зимний периоды, Вт/м<sup>2</sup>;

$\sum E_{\text{л}}$  и  $\sum E_{\text{з}}$  – суммы среднемесячных значений затрат тепла на испарение соответственно за летний и зимний периоды, Вт/м<sup>2</sup>;

$\alpha_{\text{л}}$  и  $\alpha_{\text{з}}$  – коэффициенты конвективного теплообмена для летнего и зимнего периодов, Вт/м<sup>2</sup>К, определяются по формуле:

$$\alpha = 10\sqrt{v_{\text{в}}}, \quad (12)$$

где  $v_{\text{в}}$  – средняя скорость ветра, м/сек.

Для летнего периода со средней скоростью ветра, принятой по СНиП II-A. 6-72 «Строительная климатология и геофизика» [20, табл. 7], и равной 3,5 м/сек,  $\alpha_{\text{л}}$  составит:

$$\alpha_{\text{л}} = 10\sqrt{v_{\text{в}}} = 10\sqrt{3,5} = 18,7;$$

для зимнего периода со средней скоростью ветра, равной 5,7 м/сек,  $\alpha_{\text{з}}$  составит:

$$\alpha_{\text{з}} = 10\sqrt{v_{\text{в}}} = 10\sqrt{5,7} = 24.$$

Среднемесячные значения радиационного баланса и затрат тепла на испарение вычисляются по формулам:

$$R = (Q + q)_0 (1 - 0,6n)(1 - a) - J(1 - 0,7n^2), \quad (13)$$

$$E = u(e_0 - e)(1 + 0,8v_{\text{в}}), \quad (14)$$

где  $(Q + q)_0$  – суммарная солнечная радиация на уровне моря, Вт/м<sup>2</sup>, определялась по [15, табл. 7];

$J$  – эффективное излучение при безоблачном небе, Вт/м<sup>2</sup>, определяется по [15, табл. 5];

$a$  – альbedo поверхности в долях единицы, определяется по [15, табл. 5];

$n$  – наблюдаемая облачность в долях единицы, принимается по метеоданным для района застройки, в расчетах условно принята равной 0,5;

$e_0$  – максимальная упругость водяных паров, гПа, определяется по [15, табл. 6] в зависимости от средней температуры воздуха;

$e$  – наблюдаемая абсолютная влажность воздуха, гПа, определяется по [20, табл. 4];

$u$  – коэффициент интенсивности испарения, для территории застройки  $u = 1$ .

### 1.1.3. Результаты расчета

В соответствии с формулой (4) определяем значение параметра  $K_a$  по формуле (5):

$$K_a = \sqrt{\frac{6,7 \times 10^7 + 2100 \times 10^3 \times 13,9}{10^7 \times 1,8 \times 13,9}} = 0,62.$$

Для определения параметра  $A$  рассчитываем приведенную температуру  $\theta$  по формуле (6). Для этого рассчитываем величины  $\beta$  по формуле (7) и  $T_0$  по формуле (8).

При отсутствии снежного покрова –  $\beta^0 = 1$ .

Среднемесячные значения радиационного баланса и затрат тепла на испарение вычисляются по формулам (13) и (14) для каждого месяца года:

За январь:

$$\begin{aligned} R^I &= (Q + q)_0 (1 - 0,6n)(1 - a) - J(1 - 0,7n^2) = \\ &= 75 \times (1 - 0,6 \times 0,5)(1 - 0,5) - 70 \times (1 - 0,7 \times 0,5^2) = -32 \text{ Вт/м}^2, \\ E^I &= u(e_0 - e)(1 + 0,8v_b) = 1 \times (0,72 - 1)(1 + 0,8 \times 5,7) = -2 \text{ Вт/м}^2. \end{aligned}$$

За февраль:

$$\begin{aligned} R^{II} &= 122 \times (1 - 0,6 \times 0,5) \times (1 - 0,5) - 77 \times (1 - 0,7 \times 0,5^2) = -21 \text{ Вт/м}^2, \\ E^{II} &= 1 \times (1 - 1,2) \times (1 + 0,8 \times 5,7) = -1 \text{ Вт/м}^2 \text{ и т. д.} \\ \Omega_{\text{л}} &= \sum T_{\text{вл}} + \frac{1}{\alpha_{\text{л}}} (\sum R_{\text{л}} - \sum E_{\text{л}}) = 60,9 + \frac{1}{18,7} \times (563 - 54) = 88, \\ \Omega_3 &= \sum T_{\text{вз}} + \frac{1}{\alpha_3} (\sum R_3 - \sum E_3) = -85,4 + \frac{1}{24} \times (-117 - 2) = -90. \end{aligned}$$

При отсутствии снежного покрова ( $S_c^0 = 0$ )  $T_0^0$  составит:

$$T_0^0 = \frac{B}{12} \left( \Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{th}} \Omega_3 \right) = \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) \right) = -0,6 \text{ }^\circ\text{C};$$

при толщине снежного покрова  $h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c^1 = 1,0 \text{ м}$

$$T_0^1 = \frac{B}{12} \left( \Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{th}} \Omega_3 + 8,75 \times 10^{-4} \frac{S_c^1}{\lambda_{th}} \sqrt{Z_v \lambda_f |\Omega_3|} \right) =$$

$$= \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{1,0}{1,71} \times \sqrt{6,7 \times 10^7 \times 1,8 \times |-90|} \right) = 3,9 \text{ }^\circ\text{C};$$

при  $h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c^2 = 5,76 \text{ м}$

$$T_0^2 = \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{5,76}{1,71} \times \sqrt{6,7 \times 10^7 \times 1,8 \times |-90|} \right) = 25 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при  $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^2 = 8,12 \text{ м}$

$$T_0^3 = \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,8}{1,71} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{8,12}{1,71} \sqrt{6,7 \times 10^7 \times 1,8 \times |-90|} \right) = 36 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

#### Определение поправочного коэффициента влияния снежного покрова – $\beta$

При отсутствии снежного покрова  $\beta^0 = 1$ .

При  $h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c^1 = 1,0 \text{ м}$

$$\beta^1 = \sqrt{1 + 2K_a S_c (1 + K_a S_c)} = \sqrt{1 + 2 \times 0,62 \times 1,0 \times (1 + 0,62 \times 1,0)} = 1,7.$$

При  $h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c^2 = 5,76 \text{ м}$

$$\beta^2 = \sqrt{1 + 2 \times 0,62 \times 5,76 \times (1 + 0,62 \times 5,76)} = 5,8.$$

При  $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^2 = 8,12 \text{ м}$

$$\beta^3 = \sqrt{1 + 2 \times 0,62 \times 8,12 \times (1 + 0,62 \times 8,12)} = 7,8.$$

#### Определение приведенной температуры $\theta$

При отсутствии снежного покрова

$$\theta^0 = \frac{T_0}{T_0 + T_m} \beta = \frac{-0,6}{-0,6 + 23,6} \times 1,0 = -0,02.$$

При  $h_c^1 = 0,14 \text{ м}$

$$\theta^1 = \frac{T_0^1}{T_0^1 + T_m} \beta^1 = \frac{3,9}{3,9 + 23,6} \times 1,7 = 0,2.$$

При  $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$\theta^2 = \frac{T_0^2}{T_0^2 + T_m} \beta^2 = \frac{25}{25 + 23,6} \times 5,8 = 3,0.$$

При  $h_c^3 = 1,58 \text{ м}$

$$\theta^3 = \frac{T_0^3}{T_0^3 + T_m} \beta^3 = \frac{35,6}{35,6 + 23,6} \times 7,8 = 4,7.$$

Определение коэффициента  $A$  по рис. 6 [15] в зависимости от приведенных температур  $\theta$  при значении  $\tau = 6 \text{ мес.}$

$$A^0 = 3,1; A^1 = 1,6;$$

$A^2$  и  $A^3$  – значения выходят за область графика, определение параметра  $A$  согласно [15] невозможно.

Глубина сезонного промерзания грунта,  $H_m$ , составит:  
при отсутствии снежного покрова

$$H_m^0 = \frac{A^0}{K_a} = \frac{3,1}{0,62} = 5,0 \text{ м},$$

при толщине снежного покрова  $h^1_c = 0,14$  м

$$H^1_m = \frac{A^1}{K_a} = \frac{1,6}{0,62} = 2,6 \text{ м,}$$

при толщине снежного покрова  $h^2_c = 1,12$  м и  $h^3_c = 1,58$  м по [15] глубину промерзания грунта определить невозможно.

## 1.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

### 1.2.1. Исходные данные

На данном пикете ПК1185 и 1202+50 с поверхности и до глубины залегают суглинки мягкопластичные, имеющие следующие физические характеристики:  $W = 0,274$ ;  $W_1 = 0,333$ ;  $W_p = 0,212$ ;  $I_p = 12,1$ ;  $I_1 = 0,51$ ;  $\rho = 1,85 \text{ г/см}^3$ ;  $\rho_d = 1,42 \text{ г/см}^3$ ;  $\rho_s = 2,68 \text{ г/см}^3$ ;  $e = 0,874$ ;  $S_r = 0,91$ .

Суммарная влажность суглинка составит  $W_{tot} = W_p = 0,212$ .

Тогда при  $W_{tot} = 0,212$  и  $\rho_d = 1,42 \text{ г/см}^3$  коэффициенты теплопроводности и объемной теплоемкости равны:

для мерзлого грунта:  $\lambda_f = 1,30 \text{ Вт/м}^\circ\text{С} = 1,11 \text{ ккал/мч}^\circ\text{С}$ ;  $C_f = 1930 \text{ кДж/м}^3 \text{ }^\circ\text{С} = 460 \text{ ккал/м}^3 \text{ }^\circ\text{С}$ ;

для талого грунта:  $\lambda_{th} = 1,15 \text{ Вт/м}^\circ\text{С} = 1,00 \text{ ккал/мч}^\circ\text{С}$ ;  $C_{th} = 2550 \text{ кДж/м}^3 \text{ }^\circ\text{С} = 607 \text{ ккал/м}^3 \text{ }^\circ\text{С}$ .

Температуру грунта можно определить следующим образом:

$T = 0,4T_{cs} = 0,4 \times (-13,9) = -5,56 \text{ }^\circ\text{С}$ , по [13]  $K_n$  для суглинков равен 0,44

$$W_w = K_n W_p = 0,44 \times 0,212 = 0,093.$$

Величина удельной теплоты замерзания воды (таяния льда) в единице объема грунта составит:

$$Z_v = Z_0(W_{tot} - W_w)\rho_d = 3,35 \times 10^4 \times (0,212 - 0,093) \times 14\,200 = 5,7 \times 10^7 \text{ Дж/м}^3.$$

Для данных условий  $S_c$  будет равно:

$$\text{при } h^1_c = 0,14 \text{ м} - S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,3 \times \frac{0,14}{0,25} = 0,728 \text{ м;}$$

$$\text{при } h^2_c = 1,12 \text{ м} - S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,3 \times \frac{1,12}{0,35} = 4,16 \text{ м;}$$

$$\text{при } h^3_c = 1,58 \text{ м} - S_c = \lambda_f \frac{h_c}{\lambda_c} = 1,3 \times \frac{1,58}{0,35} = 5,87 \text{ м.}$$

Среднемесячные значения радиационного баланса, затрат тепла на испарение и коэффициенты конвективного теплообмена зависят только от климатических условий площадки строительства и не зависят от свойств грунта, поэтому рассчитанные значения этих величин для пикетов ПК1181 и 1190 характерны и для ПК1185 и 1202+50.

### Расчет температуры грунта на поверхности с учетом снежного покрова

Для условий застройки снежный покров не учитывается.

При отсутствии снежного покрова ( $S^0_c = 0$ )  $T^0_0$  составит:

$$T^0_0 = \frac{B}{12} \times \left( \Omega_{\pi} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{th}} \times \Omega_3 \right) = \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) \right) = -1,14 \text{ }^\circ\text{С};$$

при толщине снежного покрова  $h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c^1 = 0,73 \text{ м}$

$$T_0^1 = \frac{B}{12} \times \left( \Omega_{\text{л}} + \frac{\lambda_f}{\lambda_{th}} \Omega_3 + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{S_c^1}{\lambda_{th}} \times \sqrt{Z_v \lambda_f |\Omega_3|} \right) =$$

$$= \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{0,73}{1,15} \times \sqrt{5,7 \times 10^7 \times 1,3 \times |-90|} \right) = 2,6 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при толщине снежного покрова  $h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c^2 = 4,16 \text{ м}$

$$T_0^2 = \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{4,16}{1,15} \times \sqrt{5,7 \times 10^7 \times 1,3 \times |-90|} \right) = 20,4 \text{ } ^\circ\text{C};$$

при толщине снежного покрова  $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^3 = 5,87 \text{ м}$

$$T_0^3 = \frac{1}{12} \times \left( 88 + \frac{1,3}{1,15} \times (-90) + 8,75 \times 10^{-4} \times \frac{5,87}{1,15} \times \sqrt{5,7 \times 10^7 \times 1,3 \times |-90|} \right) = 29,3 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Определяем параметр  $K_a$  по формуле (5):

$$K_a = \sqrt{\frac{5,7 \times 10^7 + 1930 \times 10^3 \times 13,9}{10^7 \times 1,3 \times 13,9}} = 0,68;$$

Определение поправочного коэффициента влияния снежного покрова –  $\beta$

При отсутствии снежного покрова  $\beta^0 = 1$ .

При толщине снежного покрова  $h_c^1 = 0,14 \text{ м} - S_c^1 = 0,73 \text{ м}$

$$\beta^1 = \sqrt{1 + 2K_a S_c (1 + K_a S_c)} = \sqrt{1 + 2 \times 0,68 \times 0,73 \times (1 + 0,68 \times 0,73)} = 1,6;$$

при толщине снежного покрова  $h_c^2 = 1,12 \text{ м} - S_c^2 = 4,16 \text{ м}$

$$\beta^2 = \sqrt{1 + 2 \times 0,68 \times 4,16 \times (1 + 0,68 \times 4,16)} = 4,8;$$

при толщине снежного покрова  $h_c^3 = 1,58 \text{ м} - S_c^3 = 5,87 \text{ м}$

$$\beta^3 = \sqrt{1 + 2 \times 0,68 \times 5,87 \times (1 + 0,68 \times 5,87)} = 6,4.$$

Определение приведенной температуры  $\theta$

При отсутствии снежного покрова

$$\theta^0 = \frac{T_0}{T_0 + T_M} \beta = \frac{-1,14}{-1,14 + 23,6} 1,0 = -0,1;$$

при толщине снежного покрова  $h_c^1 = 0,14 \text{ м}$

$$\theta^1 = \frac{T_0^1}{T_0^1 + T_M} \beta^1 = \frac{2,6}{2,6 + 23,6} 1,6 = 0,2;$$

при толщине снежного покрова  $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$\theta^2 = \frac{T_0^2}{T_0^2 + T_M} \beta^2 = \frac{20,4}{20,4 + 23,6} 4,8 = 2,1;$$

при толщине снежного покрова  $h^3_c = 1,58$  м

$$\theta^3 = \frac{T_0^3}{T_0^3 + T_m} \beta^3 = \frac{29,3}{29,3 + 23,6} 6,4 = 3,5.$$

Определение коэффициента А по рис. 6 [15] в зависимости от приведенных температур  $\theta$  при значении  $\tau = 6$  мес.

$$A^0 = 3,3; A^1 = 1,6;$$

$A^2$  и  $A^3$  – значения выходят за область графика, определение параметра  $A$  согласно [15] невозможно.

Глубина сезонного промерзания грунта,  $H_m$ , составит:  
 при отсутствии снежного покрова

$$H^0_m = \frac{A^0}{K_a} = \frac{3,3}{0,68} = 4,8 \text{ м};$$

при толщине снежного покрова  $h^1_c = 0,14$  м

$$H^1_m = \frac{A^1}{K_a} = \frac{1,6}{0,68} = 2,3 \text{ м};$$

при толщине снежного покрова  $h^2_c = 1,12$  м и  $h^3_c = 1,58$  м по [15] глубину промерзания грунта определить невозможно.

## 2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Справочнику по строительству на вечномерзлых грунтах» [16]

### 2.1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1181 и 1190

Нормативная глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}$ , м, в соответствии с [16] определяется по формуле:

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2\lambda_f (T_{bf} - T_{f,m}) t_{f,m}}{q_2} + S^2} - S, \tag{15}$$

где

$$q_2 = L_v - 0,5C_f(T_{f,m} - T_{bf}), \tag{16}$$

здесь  $L_v$  – теплота заморозания грунта, Дж/м<sup>3</sup> (ккал/м<sup>3</sup>), определяемая по [13] при температуре грунта  $T = 0,5(T_{f,m} - T_{bf})$ , °С, см. формулу (1);

$T_{f,m}$ ,  $t_{f,m}$  – соответственно средняя по многолетним данным температура воздуха за период отрицательных температур (равна -13,9 °С) и продолжительность этого периода (4392 ч), принимаемые по [19];

$T_{bf}$  – температура начала заморозания грунта, °С, определяемая по [13], для супеси равна 0,1 °С;

$S$  – толщина слоя грунта, термическое сопротивление которого равно термическому сопротивлению снега, определяется по формуле (9);

$w_{tot}$  – суммарная влажность грунта, принимается равной естественной влажности грунта, равной 0,34;

$\lambda_c$  – коэффициент теплопроводности снежного покрова, принимается равным 0,25 ккал/мч °С.

$$q_2 = z_0(w_{tot} - w_w)\rho_d - 0,5C_f(T_{f,m} - T_{bf}) = 80\,000 \times (0,34 - 0,065) \times 1,2 - 0,5 \times 500 \times (13,9 - 0,1) = 29\,850 \text{ ккал/м}^3.$$

Глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}^0$ , составит:  
при отсутствии снежного покрова:

$$d_{fn}^0 = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_{bf} - T_{f,m})t_{f,m}}{q_2}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850}} = 2,5 \text{ м};$$

при толщине снежного покрова  $h_c^1 = 0,14$  м

$$d_{fn}^1 = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_{bf} - T_{f,m})t_{f,m}}{q_2} + S^2} - S = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850} + \left(1,54 \times \frac{0,14}{0,25}\right)^2} - 1,54 \times \frac{0,14}{0,25} = 1,78 \text{ м};$$

при  $h_c^2 = 1,12$  м

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850} + \left(1,54 \times \frac{1,12}{0,25}\right)^2} - 1,54 \times \frac{1,12}{0,25} = 0,44 \text{ м};$$

при  $h_c^3 = 1,58$  м

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 1,54 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{29\,850} + \left(1,54 \times \frac{1,58}{0,25}\right)^2} - 1,54 \times \frac{1,58}{0,25} = 0,32 \text{ м}.$$

## 2.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

При значении  $q_2$ , равном

$$q_2 = z_0(w_{tot} - w_w)\rho_d - 0,5C_f(T_{f,m} - T_{bf}) = 80\,000 \times (0,274 - 0,093) \times 1,42 - 0,5 \times 460 \times (13,9 - 0,1) = 23\,735,6 \text{ ккал/м}^3,$$

глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}^0$ , составит:  
при отсутствии снежного покрова

$$d_{fn}^0 = \sqrt{\frac{2\lambda_f(T_{bf} - T_{f,m})t_{f,m}}{q_2}} = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23\,735,6}} = 2,38 \text{ м};$$

при  $h_c^1 = 0,14$  м

$$d_{fn}^1 = \sqrt{\frac{2\lambda_f (T_{bf} - T_{f,m}) t_{f,m}}{q_2} + S^2} - S = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23735,6} + \left(1,11 \times \frac{0,14}{0,25}\right)^2} - 1,11 \times \frac{0,14}{0,25} = 1,84 \text{ м;}$$

при  $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23735,6} + \left(1,11 \times \frac{1,12}{0,25}\right)^2} - 1,11 \times \frac{1,12}{0,25} = 0,72 \text{ м;}$$

при  $h_c^3 = 1,58 \text{ м}$

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 1,11 \times (13,9 - 0,1) \times 4392}{23735,6} + \left(1,11 \times \frac{1,58}{0,25}\right)^2} - 1,11 \times \frac{1,58}{0,25} = 0,54 \text{ м.}$$

### 3. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Рекомендациям по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов» [17]

#### 3.1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1181 и 1190

Значение нормативной глубины сезонного промерзания грунта определяем расчетным путем по [14]:

$$d_{fn} = d_0 \sqrt{M_t}, \tag{17}$$

где  $d_0$  – величина, равная для супесей 0,28 м;

$M_t$  – безразмерный коэффициент, численно равный сумме абсолютных значений среднемесячных отрицательных температур за зиму в данном районе, принимаемых по [19].

Данные о температуре воздуха приняты по близлежащему району – п. Кировское.

Среднемесячные отрицательные температуры воздуха ( $T_m$ , °С) в зимний период по многолетним данным представлены в табл. 1.

Расчетная среднемесячная температура воздуха при продолжительности зимнего периода  $\tau = 183$  будет равна  $T_0 \approx -13,9$  °С.

Таблица 1

#### Температуры приземного воздуха для п. Кировское

Table 1

#### Surface air temperatures for the Kirovskoye settlement

Температура приземного воздуха, °С												
I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Средняя
-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3	-2,04

Нормативная глубина сезонного промерзания глинистого грунта по [14] равна:

$$d_{fn} = 0,28 \times \sqrt{(9,1 + 19,3 + 23,6 + 19,7 + 12 + 1,7)} = 2,6 \text{ м.}$$

Расчетная глубина сезонного промерзания грунта,  $d_f$ , м, равна:

$$d_f = k_h \times d_{fn}, \quad (18)$$

где  $k_h$  – коэффициент, учитывающий влияние теплового режима сооружения, принимаемый равным 1,0 по [14].

Определение глубины промерзания грунта под слоем снега

$$d_{fi} = \sqrt{d_f^2 + S_c^2} - S_c, \quad (19)$$

где  $s_c$  – толщина эквивалентного слоя грунта, находится по формуле:

$$S_c = \lambda_f \left( \frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) \quad (20)$$

$\lambda_f$  – теплопроводность мерзлого грунта, равна 1,80 Вт/м °С;

$\alpha_c$  – коэффициент теплоотдачи свободной поверхности, равен 23 Вт/м °С;

$\delta_c$  – толщина снега, м;

$\lambda_c$  – теплопроводность снега, составляет 0,25 Вт/м °С.

Глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}$ , составит:

при толщине снежного покрова  $h_c^1 = 0,14$  м

$$S_c^1 = \lambda_f \left( \frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) = 1,8 \times \left( \frac{1}{23} + \frac{0,14}{0,25} \right) = 1,09 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^1 = \sqrt{d_f^2 + (S_c^1)^2} - S_c^1 = \sqrt{2,6^2 + 1,09^2} - 1,09 = 1,73 \text{ м;}$$

при  $h_c^2 = 1,12$  м

$$S_c^2 = 1,8 \times \left( \frac{1}{23} + \frac{1,12}{0,25} \right) = 8,14 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^2 = \sqrt{2,6^2 + 8,14^2} - 8,14 = 0,41 \text{ м;}$$

при  $h_c^3 = 1,58$  м

$$S_c^3 = 1,8 \times \left( \frac{1}{23} + \frac{1,58}{0,25} \right) = 11,45 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^3 = \sqrt{2,6^2 + 11,45^2} - 11,45 = 0,29 \text{ м.}$$

### 3.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

Нормативная глубина сезонного промерзания глинистого грунта по [14] равна:

$$d_{fn} = 0,23 \times \sqrt{(9,1 + 19,3 + 23,6 + 19,7 + 12 + 1,7)} = 2,13 \text{ м.}$$

Глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}^1$ , составит:  
 при  $h_c^1 = 0,14 \text{ м}$

$$S_c^1 = \lambda_f \left( \frac{1}{\alpha_c} + \frac{\delta_c}{\lambda_c} \right) = 1,3 \times \left( \frac{1}{23} + \frac{0,14}{0,25} \right) = 0,78 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^1 = \sqrt{d_{fn}^2 + (S_c^1)^2} - S_c^1 = \sqrt{2,13^2 + 0,78^2} - 0,78 = 1,48 \text{ м;}$$

при  $h_c^2 = 1,12 \text{ м}$

$$S_c^2 = 1,3 \times \left( \frac{1}{23} + \frac{1,12}{0,25} \right) = 5,88 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^2 = \sqrt{2,13^2 + 5,88^2} - 5,88 = 0,37 \text{ м;}$$

при  $h_c^3 = 1,58 \text{ м}$

$$S_c^3 = 1,3 \times \left( \frac{1}{23} + \frac{1,58}{0,25} \right) = 8,27 \text{ м;}$$

$$d_{fi}^3 = \sqrt{2,13^2 + 8,27^2} - 8,27 = 0,27 \text{ м.}$$

### 4. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов по «Рекомендациям по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов» [18]

#### 4.1. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1181 и 1190

Нормативная глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}$ , м, определяется в соответствии с [18] по формуле:

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2} + (\lambda_f R_c)^2} - \lambda_f R_c - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi} \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}, \quad (21)$$

где  $q_2$ ,  $T_{bf}$ ,  $\lambda_f$ ,  $\lambda_c$  – те же обозначения, что и в расчете 2;

$\sum(-T_{f,m})$  – сумма среднемесячных температур за период промерзания, принимается по [19] и составляет -85,4;

$\lambda_{th}$  – коэффициент теплопроводности талого грунта, для супеси  $\lambda_{th} = 1,71 \text{ Вт/мК} = 1,48 \text{ ккал/мч } ^\circ\text{C}$ ;

$C_{th}$  – объемная теплоемкость талого грунта, для супеси  $C_{th} = 2945 \text{ кДж/м}^3\text{К} = 701 \text{ ккал/м}^3\text{ } ^\circ\text{C}$ ;

$\tau_f$  – продолжительность периода промерзания, для данных климатических условий принимается по [19] и составляет 4392 ч;

$R_s$  – термическое сопротивление снега при промерзании, принимается по [18, рис. 8] в зависимости от толщины снежного покрова;

$T_T$  – среднеинтегральное значение температуры в талой зоне при промерзании, определяется по [18] в зависимости от температуры грунта  $t_{tp}$ , определяемой по [18, рис. 2] в зависимости от термического сопротивления теплоизоляции и сумм температур за летний  $\sum(+T_{th,m}) = 60,9$  и зимний  $\sum(-T_{f,m}) = 85,4$  периода.

При толщине снежного покрова  $h_c^1 = 0,14$  м и термическом сопротивлении теплоизоляции  $R_s^1 = 0,4$  при  $\lambda_{th} = \lambda_f$  температура грунта по [18, рис. 2]  $t_{tp} = -2$  °С. Понижение среднегодовой температуры грунта для соотношения  $\lambda_f/\lambda_{th} = 1,04$  в соответствии с [18, рис. 3] будет равно  $-0,4$  °С. Таким образом, истинное значение среднегодовой температуры грунта будет равно:  $t_{tp} = -2 + (-0,4) = -2,4$  °С.  $T_T$  по [18] равен  $T_T^1 = 5,4$  °С.

При толщине снежного покрова  $h_c^2 = 1,12$  м и термическом сопротивлении теплоизоляции  $R_s^2 = 2,1$  при  $\lambda_{th} = \lambda_f$  температура грунта по [18, рис. 2]  $t_{tp} = -2,5$  °С. Понижение среднегодовой температуры грунта для соотношения  $\lambda_f/\lambda_{th} = 1,04$  в соответствии с [18, рис. 3] будет равно  $-0,4$  °С. Таким образом, истинное значение среднегодовой температуры грунта будет равно:  $t_{tp} = -2,5 + (-0,4) = -2,9$  °С,  $T_T^2 = 7$  °С.

При толщине снежного покрова  $h_c^3 = 1,58$  м и термическом сопротивлении теплоизоляции  $R_s^3 = 3,5$  при  $\lambda_{th} = \lambda_f$  температура грунта по [18, рис. 2]  $t_{tp} = 1$  °С. Понижение среднегодовой температуры грунта для соотношения  $\lambda_f/\lambda_{th} = 1,04$  в соответствии с [18, рис. 3] будет равно  $-0,4$  °С. Таким образом, истинное значение среднегодовой температуры грунта будет равно:  $t_{tp} = 0,4 + (-0,4) = 0$  °С,  $T_T^3 = 1$  °С.

Глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}^*$ , составит:  
при отсутствии снежного покрова;

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2}} - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} =$$

$$\sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,54 \times 85,4}{29850}} - \frac{1,48 \times 5 \times \sqrt{4392}}{29850 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,48}{701}}} = 2,32 \text{ м};$$

при  $h_c^1 = 0,14$  м

$$d_{fn}^1 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2} + (\lambda_f R_c^1)^2} - \lambda_f R_c^1 - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,3 \times 85,4}{29850} + (1,3 \times 0,4)^2} - 1,3 \times 0,4 - \frac{1,15 \times 5,4 \times \sqrt{4392}}{29850 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,15}{701}}} = 1,76 \text{ м};$$

при  $h_c^2 = 1,12$  м

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,54 \times 85,4}{29781} + (1,54 \times 2,1)^2} - 1,54 \times 2,1 - \frac{1,48 \times 7 \times \sqrt{4392}}{29781 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,48}{701}}} = 0,58 \text{ м};$$

при  $h_c^3 = 1,58$  м

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,54 \times 85,4}{29850} + (1,54 \times 3,5)^2} - 1,54 \times 3,5 - \frac{1,48 \times 1 \times \sqrt{4392}}{29850 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,48}{701}}} = 0,52 \text{ м}.$$

#### 4.2. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов на пикетах ПК1185 и 1202+50

Глубина сезонного промерзания грунта,  $d_{fn}$ , составит:  
 при отсутствии снежного покрова

$$d_{fn} = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2}} - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6}} - \frac{1,0 \times 5 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}} = 2,20 \text{ м},$$

при  $h_c^1 = 0,14$  м

$$d_{fn}^1 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \lambda_f \sum(-T_{f,m})}{q_2}} - \frac{\lambda_{th} |T_T| \sqrt{\tau_f}}{q_2 \sqrt{\pi \frac{\lambda_{th}}{C_{th}}}} =$$

$$= \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6} + (1,11 \times 0,4)^2} - 1,11 \times 0,4 - \frac{1,0 \times 5,4 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}} = 1,80 \text{ м};$$

при  $h_c^2 = 1,12$  м

$$d_{fn}^2 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6} + (1,11 \times 2,1)^2} - 1,11 \times 2,1 - \frac{1,0 \times 7 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}} = 0,70 \text{ м};$$

при  $h_c^3 = 1,58$  м

$$d_{fn}^3 = \sqrt{\frac{2 \times 720 \times 1,11 \times 85,4}{23735,6} + (1,11 \times 3,5)^2} - 1,11 \times 3,5 - \frac{1,0 \times 1 \times \sqrt{4392}}{23735,6 \times \sqrt{3,14 \times \frac{1,0}{607}}} = 0,64 \text{ м}.$$

Результаты расчетов по четырем инженерным методикам сведены в табл. 2.

Таблица 2

**Максимальная глубина промерзания, определенная инженерными методами**

Table 2

**Maximum freezing depth determined by engineering methods**

Тип грунта	Высота снежного покрова, м	Глубина промерзания, м			
		ИМ1	ИМ2	ИМ3	ИМ4
Супесь ПК1181 и 1190	0	5,0	2,50	2,60	2,32
	0,14	2,6	1,78	1,73	1,76
	1,12	–	0,44	0,41	0,58
	1,58	–	0,32	0,29	0,52
Суглинок ПК1185 и 1202+50	0	4,8	2,38	2,13	2,20
	0,14	2,3	1,84	1,48	1,80
	1,12	–	0,72	0,37	0,70
	1,58	–	0,54	0,27	0,64

**5. Расчет глубины сезонного промерзания грунтов в программных комплексах Борей 3D и Frost 3D**

Теплотехнические расчеты выполнялись в программных комплексах Борей 3D и Frost 3D, предназначенных для расчета динамики изменений температурного поля грунтов оснований зданий и сооружений с учетом теплового влияния инженерных сооружений. Программные комплексы реализуют математический аппарат моделирования распространения температурных полей в среде с фазовыми переходами и соответствуют требованиям [13].

Процесс распространения тепла в грунте с фазовыми переходами в спектре отрицательных температур описывается дифференциальным уравнением, записанным в энтальпийной форме:

$$\frac{\delta H}{\delta \tau} = \text{div}(\lambda \times \text{grad} T) + f, \quad (22)$$

где  $H = H(\tau, T)$  – энтальпия (теплосодержание), отнесенная к единице объема грунта;

$\tau$  – время;

$T = T(\tau)$  – температура грунта;

$\lambda = \lambda(T)$  – коэффициент теплопроводности грунта;

$f = f(\tau)$  – мощность внутренних источников тепла.

Энтальпия является функцией температуры от времени и координат. С учетом теплоты фазовых переходов в грунте энтальпия описывается уравнением (2):

$$H(T_1) = \int_0^{T_1} [C(T) + Q \times \delta(T - T_{bf})] dT, \quad (23)$$

где  $C = C(T)$  – теплоемкость грунта;

$Q$  – теплота фазового перехода;

$T_{bf}$  – температура фазового перехода;

$\delta(T - T_{bf})$  – дельта-функция.

В программах реализованы два конечно-разностных метода для решения исходного дифференциального уравнения:

- метод явной двухслойной разностной схемы;
- метод с динамическим разбиением области на подобласти с явной и неявной вычислительной схемой. В качестве неявной вычислительной схемы применен метод простой итерации. Для улучшения сходимости неявного метода применяется метод регуляризации и динамический подбор шага по времени.

### Исходные данные для выполнения расчетов

В качестве исходных данных использовались следующие параметры:

- климатические условия для задания верхнего граничного условия (ГУ) модели (среднемесячная температура воздуха, скорость ветра, высота и теплопроводность снежного покрова);
- физические и теплофизические характеристики грунтов (влажность, плотность, температура фазового перехода, теплоемкость и теплопроводность в талом и мерзлом состояниях);
- начальное температурное распределение в грунтовом массиве.

На верхнем климатическом ГУ приняты значения среднемесячных температур приземного воздуха, соответствующие данным [19]. Среднемесячные значения температур воздуха приняты по ближайшей метеорологической станции, расположенной в п. Кировское, и приведены в табл. 1.

Среднемесячные значения скорости ветра и высоты снежного покрова приняты в соответствии с архивными данными и приведены в табл. 3.

Значения необходимых в качестве исходных данных физических и теплофизических свойств грунтов приведены в табл. 4 и 5.

Таблица 3

### Скорость ветра и высота снежного покрова

Table 3

### Wind speed and snow cover height

Наименование параметра	Среднее значение по месяцам (годовое)												Год
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Скорость ветра, м/с	2,9	2,8	3,0	2,9	2,7	2,4	2,2	2,4	2,9	3,4	3,3	3,2	2,8

Таблица 4

### Физические и теплофизические свойства грунтов

Table 4

### Physical and thermophysical properties of soils

Наименование грунта	$W_{tot}, \%$	$\rho_d, \text{г/см}^3$	$T_{br}, \text{°C}$	$\lambda_{th}, \text{Вт/(м °C)}$	$\lambda_r, \text{Вт/(м °C)}$	$C_{th}, \text{МДж/(м}^3 \text{°C)}$	$C_r, \text{МДж/(м}^3 \text{°C)}$
Супесь	0,22	1,51	-1,16	1,31	1,47	2,78	2,10
Суглинок	0,28	1,37	-0,43	1,41	1,57	2,93	2,15

Таблица 5

**Зависимость влажности за счет незамерзшей воды от температуры**

Table 5

**Dependence of moisture content due to unfrozen water on temperature**

Влажности за счет незамерзшей воды, $W_w$ , д. е.											
Температура	-0,1	-0,4	-0,6	-1,1	-2,1	-3,1	-4,1	-6,1	-8,1	-10,1	-15,1
Супесь	0,16	0,13	0,12	0,10	0,08	0,08	0,07	0,07	0,07	0,06	0,06
Суглинок	0,17	0,15	0,14	0,13	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,09	0,08

**Создание модели и приведение ее в стационарный режим**

В качестве расчетной области принят трехмерный грунтовый массив глубиной 50 м, с размерами в плане  $1,0 \times 1,0$  м. Шаг сетки принят адаптивным от  $0,1 \times 0,1 \times 0,1$  м до  $1,0 \times 1,0 \times 3,0$  м.

Прогнозные расчеты выполнялись на период 50 лет до 2071 года. Интервал выдачи результатов – 1 месяц. Изменяемым параметром в расчетах принята температура приземного воздуха, задаваемая в соответствии с трендом. Остальные параметры климатических условий, а также граничные условия приняты постоянными на весь период расчета.

В табл. 6 приведены ГУ модели.

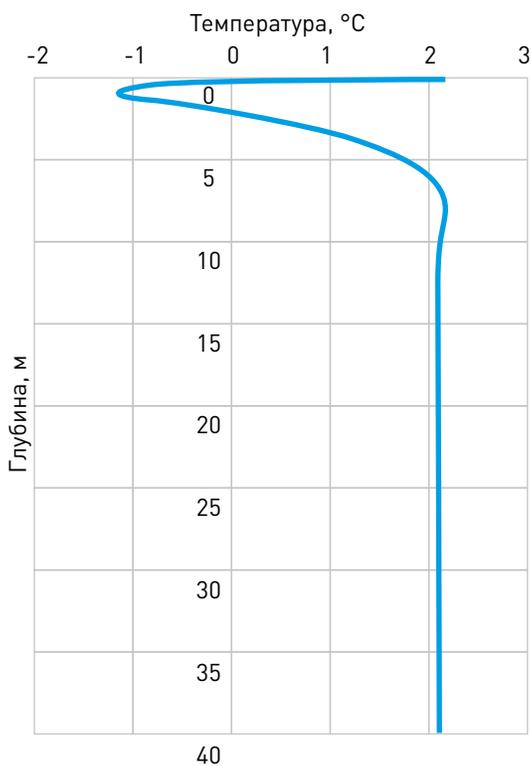
Таблица 6

**Граничные условия модели**

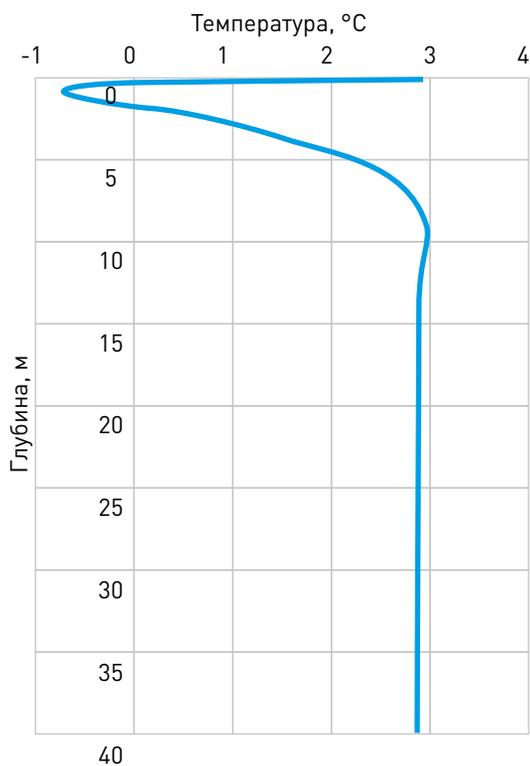
Table 6

**Boundary conditions of the model**

Локация распространения ГУ	Характеристика ГУ	Месяц											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
При отсутствии снега	Температура, °С	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м <sup>2</sup> ×К	18,4	17,9	18,7	18,2	17,6	16,0	15,3	16,3	18,1	20,2	19,9	19,4
При средней высоте снега 0,14 м	Температура, °С	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м <sup>2</sup> ×К	0,99	0,98	1,10	2,25	12,9	16,0	15,3	16,3	17,3	12,5	2,65	1,20
При средней высоте снега 0,23 м	Температура, °С	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м <sup>2</sup> ×К	0,62	0,61	0,69	1,45	10,8	16,0	15,3	16,3	18,1	9,89	1,70	0,75
При средней высоте снега 1,12 м	Температура, °С	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м <sup>2</sup> ×К	0,13	0,13	0,15	0,32	4,53	16,0	15,3	16,3	13,2	3,41	0,38	0,16
При средней высоте снега 1,58 м	Температура, °С	-23,6	-19,7	-12	-1,7	5,6	11,7	15,6	15,5	10,4	2,1	-9,1	-19,3
	Коэффициент теплообмена, Вт/м <sup>2</sup> ×К	0,09	0,09	0,10	0,23	3,47	16,0	15,3	16,3	11,8	2,54	0,27	0,11
Боковые и нижняя грани расчетной области	Тепловой поток, Вт/м <sup>2</sup>	0,0											



**Рис. 1.** График распределения температур по глубине для супеси  
**Fig. 1.** Temperature distribution by depth for sandy loam



**Рис. 2.** График распределения температур по глубине для суглинка  
**Fig. 2.** Temperature distribution by depth for loam

Перед началом теплотехнических расчетов модель приводилась в естественное температурное состояние, когда без влияния изменения высоты снежного покрова ГУ климата обеспечивают неизменяемость температурного состояния модели во времени.

По результатам приведения модели в стационарный режим по климатическим данным [19] и данным архивов получены начальные графики распределения температур по глубине на начало летнего периода для супеси и суглинка, которые приведены на рис. 1 и 2 соответственно.

### Результаты расчетов

Значения максимальной глубины промерзания при расчетах с различной высотой снежного покрова и в различных программных комплексах представлены в сводной табл. 7.

Анализ результатов проведенных расчетов показал отличие искомых величин, полученных по различным источникам друг от друга, кроме того, выявлены недостатки и трудности, с которыми может столкнуться проектировщик при расчете глубин промерзания грунтов. Расчет глубины промерзания грунта с учетом снежного покрова по «Рекомендациям по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов» [15] основан на методике, разработанной Г.В. Порхаевым. Расчет по этим рекомендациям с определением всех составляющих теплового баланса поверхности

Таблица 7

**Максимальная глубина промерзания, определенная численными методами**

Table 7

**Maximum freezing depth determined by numerical methods**

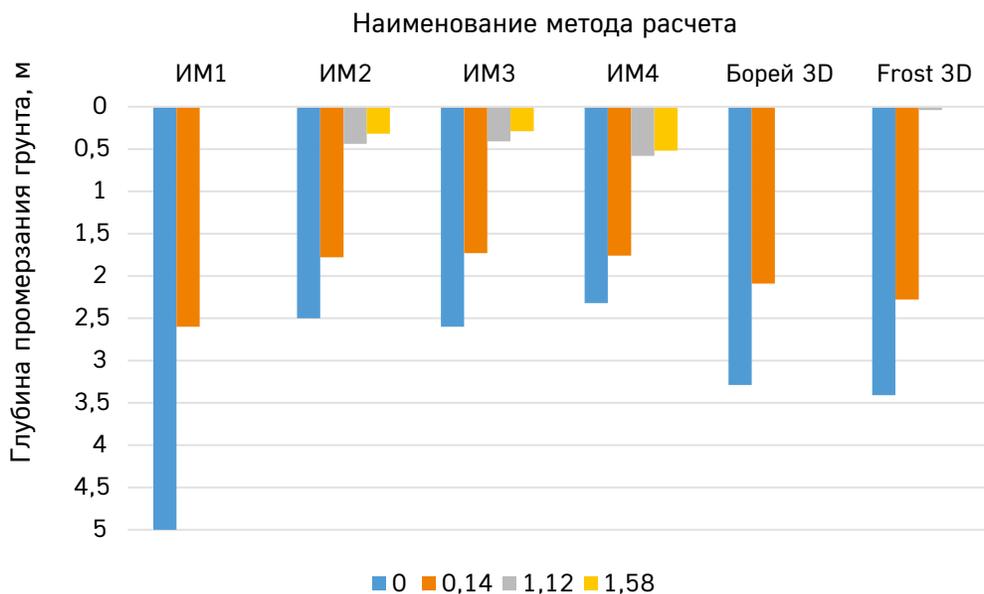
Тип грунта	Высота снежного покрова, м	Глубина промерзания, м	
		Борей 3D	Frost 3D
Супесь ПК1181 и 1190	0	3,29	3,41
	0,14	2,09	2,28
	0,23	1,56	1,54
	1,12	–	0,04
	1,58	–	–
Суглинок ПК1185 и 1202+50	0	3,30	3,31
	0,14	2,35	2,49
	0,23	1,91	1,88
	1,12	0,34	0,39
	1,58	–	0,06

грунта – метеорологических, радиационных, тепловых и физических свойств снега и грунта в талом и мерзлом состояниях – представляет значительные сложности и может быть выполнен лишь с той или иной степенью приближения, что осложняет применение рекомендаций на практике, особенно если учесть, что для достоверности получаемых результатов необходимо пользоваться средними многолетними данными. Кроме того, проведенные расчеты по этим рекомендациям (табл. 2, рис. 3, 4) показали, что полученная величина глубины промерзания несколько завышена и определить глубину промерзания грунта при толщине снежного покрова большего 0,15 м (для данных условий) не представляется возможным из-за невозможности определения параметра  $A$  по графику для больших слоев снега.

В основу расчетов глубины промерзания грунта в [16, 18] заложена формула Стефана. Различие в методиках заключается в том, что в [18] учитывается влияние талого грунта на глубины промерзания, несколько снижая ее, при этом существенно усложняется расчет, поэтому для упрощения расчетов и некоторого запаса предпочтительнее пользоваться расчетом по [16], кроме того, в [13] используется та же методика, но только без учета теплоизоляции (снежного покрова).

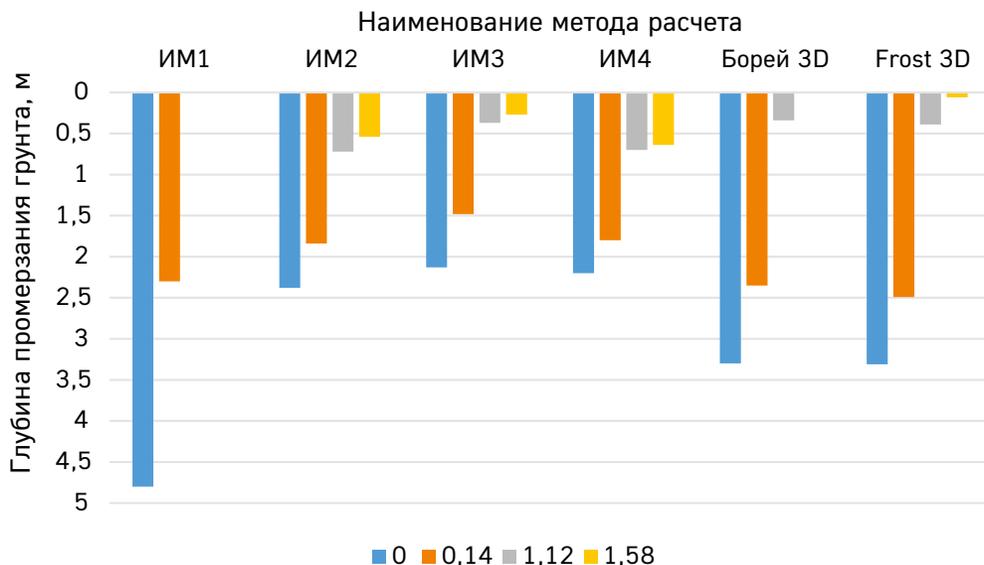
Расчет по методике, изложенной в [17], позволяет приближенно оценить глубину промерзания грунта под слоем снега и может использоваться для ориентировочных расчетов. В основе расчета лежит определение глубины промерзания грунта по [14].

Полученные величины глубин сезонного промерзания грунтов с учетом снежного покрова, рассчитанные по разным методикам, сведены в табл. 2 и представлены на рис. 3 и 4.



**Рис. 3.** Расчетные значения глубины промерзания для ПК1181 и 1190, определенные инженерными (ИМ1–ИМ4) и численными (Борей 3D и Frost 3D) методами

**Fig. 3.** Calculated values of freezing depth for PK 1181 and PK 1190 determined by engineering methods (EM1–EM4) and numerical methods (Borey 3D and Frost 3D)



**Рис. 4.** Расчетные значения глубины промерзания песка, определенные инженерными (ИМ1–ИМ4) и численными (Борей 3D и Frost 3D) методами

**Fig. 4.** Calculated values of sand freezing depth determined by engineering methods (EM1–EM4) and numerical methods (Borey 3D and Frost 3D)

Численные расчеты имеют схожие между собой результаты. Наибольшее отличие (4 %) в величине глубины промерзания соответствует оголенной поверхности и заснеженной поверхности мощностью 0,14 м (6–9 %). При значительной высоте снежного покрова 1,12 и 1,58 м также отмечены отличия в величине расчетной глубины промерзания грунта. Программный комплекс Frost 3D определяет глубину промерзания супеси со снегом  $h = 1,12$  м и суглинка с  $h = 1,58$  м, программный комплекс Борей 3D не определяет промерзание грунта при данных условиях.

Инженерные методы ИМ2–ИМ4 дают схожие результаты для оголенной поверхности и снежного покрова высотой 0,14 м, отличаясь друг от друга на 20 %. Большие отличия (в 44 %) характерны для заснеженных площадок (1,12–1,58 м). При этом инженерные расчеты показывают существенно меньшие значения глубины промерзания по сравнению с численными расчетами (32–47 %).

Численные методы базируются на нормативных документах [13] или ИМ3 для данного исследования.

Численные расчеты определили существенно большую глубину промерзания грунта. С одной стороны, это реализует дополнительный запас, с другой – приводит к перерасходу материала (большая длина свай, наличие излишней противопучинистой обмазки и др.).

Для повышения эффективности определения глубины сезонного промерзания грунтов следует выполнить разработку нового метода и модификацию теплотехнических программных комплексов с выполнением полевых экспериментальных исследований.

## Выводы

Выполнены сравнительные расчеты инженерными и численными методами по определению глубины сезонного промерзания грунта на примере двух площадок, расположенных в Сахалинской области.

Расчет глубины промерзания грунта с определением всех составляющих теплового баланса поверхности грунта – метеорологических, радиационных, тепловых и физических свойств снега и грунта в талом и мерзлом состояниях – представляет значительные сложности и может быть выполнен лишь с той или иной степенью приближения, что осложняет применение данной методологии на практике, особенно если учесть, что для достоверности получаемых результатов необходимо пользоваться средними многолетними данными.

Наиболее достоверные результаты расчетов, вошедшие в нормативные документы [13], получены по методикам, в которые заложена формула Стефана с учетом снежного покрова.

Численные расчеты для условий оголенной поверхности дают завышенные значения до 47 % по сравнению с инженерными нормативными расчетами.

Дальнейшее совершенствование как инженерных, так и численных методик расчета сезонной глубины промерзания грунта позволит обеспечить надежность фундаментов и сократить затраты на их устройство. Разработку следует вести с использованием результатов натурных замеров на нескольких типовых площадках.

## Список литературы

1. *Alekseev A., Gribovskii G., Vinogradova S.* Analytical solution of the semi-infinite problem of soil freezing with numerical solutions in various simulation software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365:042059. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/365/4/042059>
2. *Кудрявцев С.А.* Геотехническое моделирование процесса промерзания и оттаивания сезонно промерзающих морозоопасных грунтов юга Дальнего Востока. В: Современные технологии – железнодорожному транспорту и промышленности. Труды 44-й Всерос. науч.-практ. конф. ученых транспортных вузов, инженерных работников и представителей Академии науки. Том 1. Хабаровск; 2006, с. 40–45.
3. *Ким Х.Ч.* Совершенствование методов расчета глубины сезонного промерзания пучинистых грунтов земляного полотна железнодорожного пути [диссертация]. Новосибирск; 2013.
4. *Ермилов М.В., Болотина Ю.О., Якушев А.А.* Факторы неравномерности сезонного промерзания грунтов. В: Строительство – формирование среды жизнедеятельности: сб. материалов XIX Междунар. межвузовской науч.-практ. конф. студентов, магистрантов, аспирантов и молодых ученых. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 2016, с. 1033–1037.
5. *Калашников А.В., Деменков О.В.* Постановка задачи к расчету глубин сезонного промерзания-оттаивания обводненных грунтов. В: Проблемы освоения нефтегазовых месторождений приарктических территорий России. Материалы Всерос. науч.-практ. конф. Вып. 3. Архангельск: Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова; 2020, с. 32–37.
6. *Ершов Э.Д., Нефедьева Ю.А., Мотенко Р.Г., Пармузин С.Ю.* Прогноз изменения глубины сезонного оттаивания и промерзания грунтов под влиянием нефтяного загрязнения. Вестник Московского университета. Сер. 4: геология. 2007;(6):7–50.
7. *Заболотник С.И., Заболотник П.С.* Температура, сезонное протаивание и промерзание грунтов под зданиями якутской ТЭЦ и на прилегающей к ним территории. Наука и образование. 2009;(4):70–75.
8. *Каркашадзе Г.Г., Бельченко Е.Л.* Определение глубины сезонного промерзания грунтов при наличии многослойного утепления на поверхности. Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999;(1):24–26.
9. *Li J.* Macro-micro characteristics of geopolymer-stabilized saline soil in seasonal frozen soil region. Transoilcold 2023. Материалы 6-го Междунар. симпозиума по строительному инжинирингу грунтовых сооружений на транспорте в холодных регионах. Москва: Дашков и К; 2023, с. 193.
10. *Тукбаев Н.Э.* Численное моделирование сезонного теплообмена в верхних слоях грунта без промерзания. В: Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов 28-й Междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. Москва; 2022, с. 525.
11. *Гудун М.А.* Методика расчета сезонного промерзания деятельного слоя грунта. Динамика систем, механизмов и машин. 2014;(2):75–79.
12. *Иванов К.С., Галлямов Д.Р., Дашинимаев З.Б.* Исследование промерзания грунта с применением теплоизоляции из гранулированной пеностеклокерамики. Вестник Забайкальского государственного университета. 2019;25(7):34–44. <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-7-34-44>
13. СП 25.13330.2020. Основания и фундаменты на вечномерзлых грунтах [интернет]. Москва; 2020. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/>
14. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83\* [интернет]. Москва; 2016. Режим доступа: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>
15. Рекомендации по теплотехническим расчетам и прокладке трубопроводов в районах с глубоким сезонным промерзанием грунтов. Москва: НИИОСП; 1975.
16. Справочник по строительству на вечномерзлых грунтах. Ленинград: Стройиздат; 1977.
17. Рекомендации по учету и предупреждению деформаций и сил морозного пучения грунтов. Москва: Стройиздат; 1986.
18. Рекомендации по прогнозу теплового состояния мерзлых грунтов. Москва: Стройиздат; 1989.
19. СНиП 23-01-99. Строительная климатология [интернет]. Москва; 2006. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294849/4294849698.pdf>
20. СНиП II-A. 6-72. Строительная климатология и геофизика [интернет]. Москва; 1973. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293828/4293828389.htm>

## References

1. *Alekseev A., Gribovskii G., Vinogradova S.* Analytical solution of the semi-infinite problem of soil freezing with numerical solutions in various simulation software. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018;365:042059. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/365/4/042059>
2. *Kudryavtsev S.A.* Geotechnical modeling of the process of freezing and thawing seasonally freezing frost-hazardous soils of the south of the Far East. In: Modern technologies for railway transport and industry. Proceedings of the 44th All-Russian Scientific and Practical Conference of scientists of transport universities, engineering workers and representatives of the Academy of Science. Vol. 1. Khabarovsk; 2006, pp. 40–45. (In Russian).
3. *Kim H.H.* Improvement of methods for calculating the depth of seasonal freezing of deep soils of the railway trackbed [dissertation]. Novosibirsk; 2013. (In Russian).
4. *Ermilov M.V., Bolotina Yu.O., Yakushev A.A.* Factors of uneven seasonal freezing of soils. In: Construction – formation of the environment of vital activity collection of materials of the XIX International interuniversity scientific and practical conference of students, undergraduates, postgraduates and young scientists. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering (National Research University); 2016, pp. 1033–1037. (In Russian).
5. *Kalashnikov A.V., Demenkov O.V.* Formulation of the problem for calculating the depths of seasonal freezing-thawing of watered soils. In: Problems of development of oil and gas fields in the Arctic territories of Russia. Materials of the All-Russian scientific and practical conference. Iss. 3. Arkhangelsk: Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; 2020, pp. 32–37. (In Russian).
6. *Ershov E.D., Nefedieva Yu.A., Motenko R.G., Parmuzin S.Yu.* Forecast of changes in the depth of seasonal thawing and freezing of soils under the influence of oil pollution. Moscow University Bulletin. Series 4. Geology. 2007;(6):7–50. (In Russian).
7. *Zabolotnik S.I., Zabolotnik P.S.* Temperature, seasonal thawing and freezing of soils under the buildings of the Yakut thermal power plant and in the adjacent territory. Science and Education. 2009;(4):70–75. (In Russian).
8. *Karkashadze G.G., Belchenko E.L.* Determination of the depth of seasonal soil freezing in the presence of multilayer insulation on the surface. Mining information and analytical bulletin. 1999;(1):24–26. (In Russian).
9. *Li J.* Macro-micro characteristics of geopolymer-stabilized saline soil in seasonal frozen soil region. In: Transsoilcold 2023. Proceedings of the 6th International Symposium on Construction Engineering of Ground Structures in Transport in Cold Regions. Moscow: Dashkov i K Publ.; 2023, p. 193. (In Russian).
10. *Tukbaev N.E.* Numerical modeling of seasonal heat transfer in the upper layers of soil without freezing. In: Radioelectronics, electrical engineering and power engineering abstracts of the Twenty-eighth international scientific and technical conference of students and postgraduates. Moscow; 2022, pp. 525. (In Russian).
11. *Gudun M.A.* Methodology for calculating seasonal freezing of the active soil layer. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines. 2014;(2):75–79. (In Russian).
12. *Ivanov K.S., Gallyamov D.R., Dashinimaev Z.B.* Study of freezing ground with the application of heat insulation granular foamed glass ceramics. Transbaikal state university journal. 2019;25(7):34–44. (In Russian). <https://doi.org/10.21209/2227-9245-2019-25-7-34-44>
13. SP 25.13330.2020. Soil bases and foundations on permafrost soils [internet]. Moscow; 2020. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/117292/>. (In Russian).
14. SP 22.13330.2016. Soil bases of buildings and structures [internet]. Updated version of SNiP 2.02.01-83\*. Moscow; 2016. Available at: <https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/14627/>. (In Russian).
15. Recommendations on thermal engineering calculations and pipeline laying in areas with deep seasonal soil freezing. Moscow: NIIOSP; 1975. (In Russian).
16. Handbook on construction on permafrost soils. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1977. (In Russian).
17. Recommendations on accounting and prevention of deformations and forces of frost heaving of soils. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1986. (In Russian).
18. Recommendations for the forecast of the thermal state of frozen soils. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1989. (In Russian).
19. SNiP 23-01-99. Building climatology [internet]. Moscow; 2006. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294849/4294849698.pdf> (In Russian).
20. SNiP II-A. 6-72. Building climatology and geophysics [internet]. Moscow; 1973. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Index2/1/4293828/4293828389.htm> (In Russian).

## **Информация об авторе / Information about the author**

**Андрей Григорьевич Алексеев**, д-р техн. наук, руководитель центра геокриологических и геотехнических условий, НИИОСП им. Н.М. Герсеванова АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры механики грунтов и геотехники, НИУ МГСУ, Москва  
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

**Andrei G. Alekseev**, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research, Research Institute of Bases and Underground Structures named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow  
e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

УДК 624.012.1/2

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-83-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-83-94)

EDN: RWAVLZ

# ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ В РАЗВИТИИ НОРМ ПО КАМЕННЫМ КОНСТРУКЦИЯМ

М.К. ИЩУК, д-р техн. наук

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

## Аннотация

**Введение.** За последние годы по многим вопросам нарушились связи между основополагающими нормативными документами по каменной кладке, базирующимися на созданной много лет назад системе нормативных документов.

**Цель.** Выявить основные проблемные вопросы и наметить пути их решения. В первую очередь это относится к несогласованности ГОСТов на методы испытаний кирпича и раствора и сводов правил по проектированию каменных конструкций.

**Материалы и методы.** В работе показано, что прочность кирпича и раствора – это условные величины, которые во многом зависят от методов их испытаний, формы и размеров образцов, условий их выдержки до испытания. В СП 15.13330 «Каменные и армокаменные конструкции», являющемся актуализированной редакцией СНиП II-22-81\*, при назначении расчетных сопротивлений кладки марки кирпича и раствора приняты по результатам испытаний в соответствии с действовавшими на тот момент ГОСТами.

Для восстановления взаимосвязи с ГОСТами в СП 15.13330.2012 внесены коррективы по назначению расчетных сопротивлений кладки. Данное решение является компромиссным. Оптимальным является введение в ГОСТ для кирпича пластического формования коэффициентов перехода от прочности шлифованного кирпича к прочности кирпича с выровненной раствором поверхностью.

Приведенные в ГОСТ на испытания кладки типы образцов в виде стенок заимствованы из европейских норм. Испытание стенок наряду со столбами без учета масштабного фактора приводит к некорректным результатам.

**Выводы.** Нарушению взаимосвязи между ГОСТами на методы испытаний материалов и сводами правил на проектирование во многом служит лоббирование интересов производителями материалов, стремящихся добиться для себя наибольшей выгоды. Порой происходит необоснованное стремление вмешаться в процесс разработки сводов правил.

С другой стороны, разработка качественных нормативных документов невозможна без взаимодействия всего профессионального сообщества, учета интересов всех сторон. Однако баланс интересов не должен способствовать снижению надежности возводимых зданий и сооружений.

**Ключевые слова:** каменная кладка, система нормативных документов, ГОСТы на методы испытаний, своды правил

**Для цитирования:** Ищук М.К. Проблемные вопросы в развитии норм по каменным конструкциям. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):83–94. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-83-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-83-94)

## Вклад автора

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

## Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Конфликт интересов

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.07.2024

Поступила после рецензирования 25.07.2024

Принята к публикации 01.08.2024

## PROBLEMATIC ISSUES IN THE DEVELOPMENT OF NORMS FOR MASONRY STRUCTURES

M.K. ISHCHUK, Dr. Sci. (Engineering)

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

### Abstract

*Introduction.* In recent years, important connections between the regulatory documents on masonry structures, which were based on a system established many years ago, have been destroyed.

*Aim.* To identify the key issues and to outline approaches to their solution. This primarily concerns the inconsistency of State Standards on brick and mortar testing methods, as well as codes of practice for the design of masonry structures.

*Results.* It is shown that the strength of brick and mortar are conditional values, which depend largely on the methods of their testing, shape and size of specimens, exposure conditions prior to testing. In SP 15.13330.2012 "Masonry and reinforced masonry structures", which is an updated version of SNiP II-22-81\*, the design resistance of masonry brick and mortar grades were assigned according to the results of tests in accordance with the State Standards in force at that time. In order to restore connections with State Standards, revisions concerning the design resistance of masonry structures were introduced in SP 15.13330. This was a compromise solution. An optimal solution would be to complement the State Standard for plastic molding bricks with transition coefficients from the strength of polished bricks to the strength of bricks with a mortar-levelled surface. The types of specimens in the State Standard for masonry testing in the form of walls are borrowed from European norms. Testing walls along with columns without taking the scale factor into account leads to incorrect results.

*Conclusions.* Violation of the connections between State Standards for material testing methods and codes of practice for design occurs largely due to lobbying by material manufacturers, who seek to achieve the greatest benefit for themselves. Sometimes there is an unreasonable desire to interfere in the process of developing codes of practice. On the other hand, the development of high-quality regulatory documents is impossible without the involvement of a broader professional community, taking the interests of all parties into account. However, the balance of interests must not translate into the reduction of reliability of buildings and structures under construction.

**Keywords:** masonry, system of regulatory documents, State Standards for testing methods of masonry materials, codes of rules for masonry structures

**For citation:** Ishchuk M.K. Problematic issues in the development of norms for masonry structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):83–94. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-83-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-83-94)

### 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 03.07.2024*

*Revised 25.07.2024*

*Accepted 01.08.2024*

## Введение

Система нормативных документов по каменным конструкциям, создававшаяся не один десяток лет и включающая в себя СНиПы и пособия к ним, рекомендации, ГОСТы на кладочные материалы (кирпич, камень, блоки, кладочные растворы) и методы их испытаний, по ряду причин оказалась разбалансированной.

В первую очередь это относится к нарушению взаимосвязи между ГОСТами на методы испытаний материалов и сводами правил на проектирование. Причиной тому во многом служит лоббирование интересов производителей материалов, стремящихся добиться для себя наибольшей выгоды. Порой происходит необоснованное стремление вмешаться в процесс разработки сводов правил.

С другой стороны, разработка качественных нормативных документов невозможна без взаимодействия всего профессионального сообщества, учета интересов всех сторон. Однако баланс интересов не должен способствовать снижению надежности возводимых зданий и сооружений.

## Работа кирпича и раствора в кладке при ее сжатии

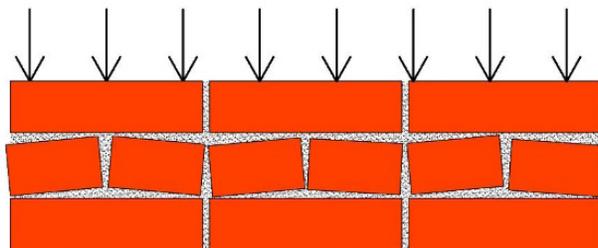
Прочность кладки при сжатии ниже прочности кирпича и раствора, из которых она выполнена. Так, при марке кирпича и раствора М100 (100 кг/см<sup>2</sup>) прочность кладки 36 кг/см<sup>2</sup>. Объяснением тому служит то, что кирпич в кладке при ее сжатии разрушается от изгиба и среза вследствие неоднородности горизонтальных растворных швов (рис. 1).

В формуле Л. И. Онищика (1), описывающей зависимость прочности кладки на сжатие от прочности кирпича и раствора, неполное использование прочности кирпича на сжатие учитывается коэффициентом  $A$ . Этот коэффициент принимает наименьшее из значений, зависящих от прочности кирпича на сжатие и прочности кирпича на изгиб (2) [1]:

$$R_u = AR_1 \left( 1 - \frac{a}{b + \frac{1}{2} \frac{R_2}{R_1}} \right) \gamma, \quad (1)$$

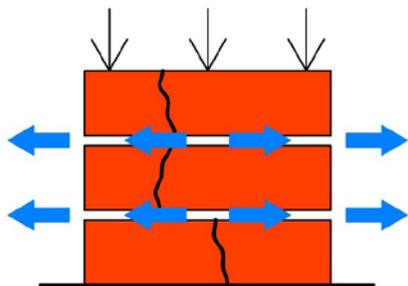
где  $R_u$  – предел прочности кладки при сжатии;

$R_1$  – предел прочности камня при сжатии;



**Рис. 1.** Разрушение кирпича в кладке при сжатии от изгиба из-за неоднородности растворной постели и неровности на контакте с кирпичом

**Fig. 1.** Failure of brick in masonry under flexural compression due to inhomogeneity of mortar bed and irregularity at brick contacts



**Рис. 2.** Дополнительные растягивающие усилия в кирпиче при коэффициенте поперечного расширения у раствора выше, чем у кирпича

**Fig. 2.** Additional tensile loads in brick when the mortar has a coefficient of transverse expansion higher than that of brick

$R_2$  – предел прочности раствора при сжатии;

$\gamma$  – понижающий коэффициент для растворов марок М25 и ниже;

$A$  – конструктивный коэффициент, характеризующий степень использования в кладке прочности камня, принимаемый наименьшим из полученных по формулам:

$$A = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{100 + R_1}{100 m + n R_1} \\ \frac{1,2}{1 + R_1 / 3 R_{u,b}} \end{array} < 1,0, \quad (2) \right.$$

где  $R_{u,b}$  – предел прочности кирпича при изгибе.

Коэффициенты  $a, b, m, n$  в формулах (1) и (2) зависят от вида камня.

В случае, когда коэффициент поперечного расширения у раствора выше, чем у кирпича, тому же способствуют возникающие вследствие поперечного расширения раствора горизонтальные растягивающие напряжения [2].

При качественных растворных швах и ровной поверхности кирпичей изгиб кирпича происходит в меньшей степени и прочность кладки повышается. При выполнении кладки каменщиком с низкой квалификацией ее прочность может оказаться в полтора раза ниже, чем у квалифицированного каменщика. В работе [3] показано, что прочность кладки улучшенного качества выше в 1,5–2,2 раза обычной кладки.

В работе [4] Л. И. Онищик писал, что при назначении прочности кладки принято значение коэффициента, характеризующего качество кладки в зависимости от квалификации каменщика  $K_{рука\ каменщ} = 1,0$ . Для малоквалифицированных каменщиков  $K_{рука\ каменщ} = 0,9$ . Многими исследователями это не учитывается, что может привести к неверному трактованию экспериментальных данных. С целью устранения этого целесообразно в новую редакцию ГОСТ 32047-2012 [5] ввести понятие коэффициента  $K_{рука\ каменщ}$  и учитывать его при назначении сопротивления кладки сжатию.

## Взаимосвязь методов испытания кирпича с прочностью кладки в формуле Л. И. Онищика

Прочность кирпича на сжатие – это условная величина, зависящая от способа и условий подготовки образцов. При выводе формулы (1) Л. И. Онищик заложил туда значения прочности кирпича при его сжатии  $R_1$ , получаемые из испытания в прессе на сжатие кирпичей, поверхности которых выравнивают раствором. Таблицы расчетных сопротивлений кладки в СНиП II-22-81\* «Каменные и армокаменные конструкции» основываются на формуле Л. И. Онищика (1), где прочность кирпича на сжатие определялась на образцах с выравниванием поверхности раствором. Испытания кирпича проводились по ГОСТ 8462-85 [6], где основным способом выравнивания поверхности принято выравнивание раствором, а для альтернативных методов (шлифование и войлочные прокладки) вводился коэффициент перехода к основному:

$$K = \frac{R_1}{R_2}, \quad (3)$$

где  $R_1$  – предел прочности при сжатии образцов из кирпича или камней и изготовленных с выравниванием поверхностей раствором;

$R_2$  – предел прочности при сжатии образцов, поверхности которых выровнены альтернативным способом.

В работах [7–14] приведены результаты сравнительных испытаний образцов из керамического кирпича и камня на сжатие при различных способах выравнивания их поверхности.

Анализ результатов испытаний различных авторов позволяет сделать вывод, что выравнивание поверхности образцов шлифованием позволяет получить прочность образцов с выровненной раствором поверхностью практически на одну марку выше.

Многие заводы предпочитают выравнивание поверхности кирпича шлифованием. В отличие от выравнивания раствором этот способ не требует длительной выдержки образцов, показывает более стабильные результаты.

На прочность кирпича при его испытании на сжатие помимо неровности его поверхности, вызывающей концентрацию напряжений, способствующих изгибу и срезу, большую роль играет сдерживание поперечных деформаций плитами пресса. Применение войлочных прокладок снижает трение о плиты пресса, благодаря чему характер разрушения отличается, а результаты оказываются ниже.

Итак, выравнивание поверхности шлифованием с применением переходного коэффициента  $K$  по [6] позволяло, с одной стороны, удовлетворить выбор заводов, а с другой – сохранить целостный механизм увязки нормативных документов (рис. 3).

В 2007 г. появился ГОСТ 530-2007 «Кирпич и камни керамические. Общие технические условия» [15]. В нем выравнивание поверхности раствором в соответствии с [6] принималось основным способом.

Первые нарушения целостного механизма, связывающего ГОСТы на испытание и СП 15.13330.2012 «Каменные и армокаменные конструкции» [16] (разработан на основе СНиП П-22-81\*), начались в 2012 году, когда в ГОСТ 530-2012 [17] были внесены изменения, указывающие на то, что шлифование является основным способом подготовки поверхности. При этом ГОСТ 8462-85 [6] продолжал действовать и это как-то снимало противоречие с СП 15.13330.2012 [16] (рис. 4).

Ударом по целостному механизму явилась отмена ГОСТ 8462-85 [6] и его замена на ГОСТ Р 58527-2019 [18], где основным способом принято выравнивание поверхности шлифованием.

Изменение метода испытания кирпича требует изменение эмпирических коэффициентов в формуле (1) и таблиц расчетных сопротивлений кладки в [16], подсчитанных по этой формуле. В связи с этим в примечаниях к табл. 6.1 записано:

Расчетные сопротивления кладки в таблицах [16] получены из испытаний образцов кладки при определении прочности кирпича с выравниванием поверхности раствором. По этой причине приведенные в таблице расчетные сопротивления кладки умножают на коэффициенты перехода  $K_R$ , зависящие от способа выравнивания поверхности кирпича при испытании:

– 1,0 в случае выравнивания поверхности раствором;



Рис. 3. Сбалансированная система нормативных документов до 2012 г.  
Fig. 3. Balanced system of regulatory documents up to 2012

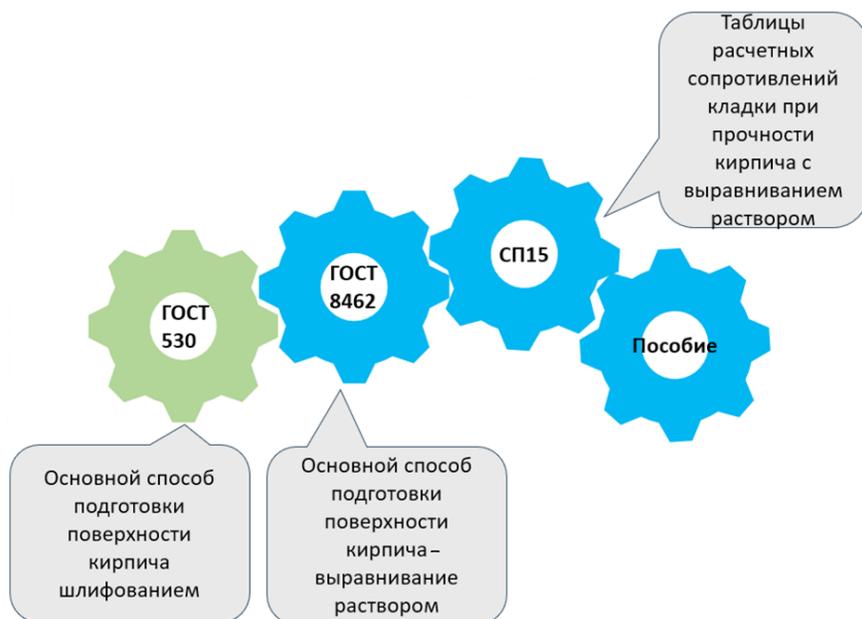
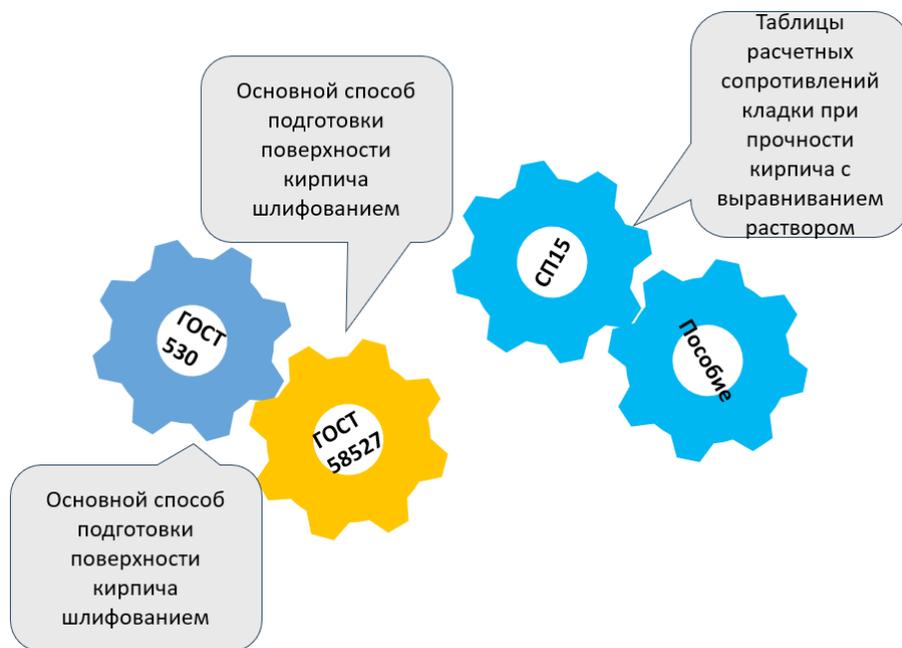


Рис. 4. Первое нарушение в системе нормативных документов с 2012 по 2019 г. с введением ГОСТ 530-2012 [17]  
Fig. 4. First violation in the system of regulatory documents from 2012 to 2019 with the introduction of State Standard 530-2012 [17]



**Рис. 5.** Окончательная разбалансировка системы нормативных документов с отменой ГОСТ 8462-85 [6] и заменой его ГОСТ Р 58527-2019 [18] в 2019 г.  
**Fig. 5.** Ultimate imbalance of the system of regulatory documents with the abolition of State Standard 8462-85 [6] and its replacement by State Standard R 58527-2019 [18] in 2019

– 0,9 в случае выравнивания поверхности шлифованием (требования этого пункта не относятся к камню и кирпичу, поставляемому на строительную площадку со шлифованными поверхностями, соответствующими требованиям [18]).

Это вынужденная мера, поскольку оптимальным решением было назначение марки кирпича в [17] с понижающим переходным коэффициентом при выравнивании поверхности шлифованием.

Справедливости ради отметим, что с появлением на отечественном рынке кирпичей более высоких марок способ выравнивания поверхности раствором потребовал корректировки. Выравнивание должно производиться раствором прочностью не менее 330 кгс/см<sup>2</sup> на момент испытания.

В DIN EN 772-1 [19] и идентичном ему белорусском стандарте СТБ EN 772-1 [20] выравнивание поверхности производится двумя способами – шлифованием и раствором. Отклонение от плоскостности нагружаемых поверхностей образца не должно превышать 0,1 мм на каждые 100 мм длины. Отклонение от прямолинейности верхней поверхности образца не должно превышать 1 мм на каждые 100 мм длины. Если эти требования не выполняются, то поверхности выравниваются шлифованием или раствором. Способ подготовки поверхности указывают в протоколе испытаний. Для выравнивания применяют цементно-песчаный раствор, прочность которого равна минимальному нормируемому значению прочности при сжатии кирпича, камня, блока, но не выше 30 МПа. При коэффициенте формы, равном 0,8 при переходе от кубов с ребром 4 см к кубам с ребром 7 см, это соответствует прочности раствора 37,5 МПа.

Как отмечалось, прочность кладки во многом определяется прочностью кирпича на изгиб. С сожалением стоит констатировать, что в [17] требования по минимальной прочности кирпича при изгибе при назначении марки изделия были сняты для кирпичей низких марок (М75 и ниже), зачастую трещиноватых и имеющих низкую изгибную прочность.

## **Взаимосвязь методов испытания раствора с прочностью кладки в формуле Л. И. Онищика**

Первоначально прочность раствора оценивалась по результатам испытаний кубов, изготавливаемых в стальных формах с дном. В дальнейшем было предложено перейти к испытаниям кубов, изготавливаемых в формах без дна и устанавливаемых на пористое основание (кирпич) для возможности отсоса влаги. Такой способ изготовления кубов представлялся более близким к поведению раствора при его твердении в кладке. В работе [1] Л. И. Онищик пишет, что при испытании кубиков, изготовленных на пористом основании с отсосом влаги, получается более высокая (примерно в 2 раза) прочность раствора. В ГОСТ 5802-86 [21] основным является изготовление кубов в формах с металлическим дном, в связи с чем требуется очередная корректировка всех (!) таблиц расчетных сопротивлений кладки в [16] путем введения коэффициента перехода к марке раствора. Величина этого коэффициента в настоящее время требует уточнения.

## **Влияние габаритов и формы экспериментальных образцов кладки**

В ГОСТ [5] даны два типа экспериментальных образцов – стенки, заимствованные из EN 1052-1-2009 [22], и традиционные для российских методов испытаний столбы. Полученные из испытаний образцов стенок и столбов значения прочности кладки могут отличаться в ту или иную сторону от среднего значения на 12%. В связи с этим целесообразно внести в ГОСТ [5] коэффициенты формы, с помощью которых полученная из испытаний прочность кладки приводится к единому стандарту.

## **Общий вид формулы Л. И. Онищика**

С учетом изложенного выше временное сопротивление кладки сжатию  $R_u$  рекомендуется вычислять по следующей видоизмененной формуле (1):

$$R_u = K_{\text{рука камень}} K_{\text{габар}} AR_1 \left( 1 - \frac{a}{b + \frac{1}{2}R_2} \right) \gamma, \quad (4)$$

где  $R_u$  – временное сопротивление кладки сжатию, определенное из испытаний столбов с габаритами в плане  $0,38 \times 0,51$  см.

## **К вопросу о керамическом кирпиче полусухого прессования**

Исключение из ГОСТ [17] термина «кирпич полусухого прессования» – очередная нестыковка с СП [16]. Несмотря на отдельные преимущества такого кирпича благодаря его ровной поверхности, долговечность кладки из него ниже. Исключение его из норм

привело бы к приравниванию такого кирпича к кирпичу пластического прессования и снятию ограничений на его применение (например, в дымовых трубах, стенах подвалов, фундаментах и т. п.).

## Заключение

1. Получаемые в испытаниях прочностные характеристики кирпича (камня) и раствора носят условный характер и во многом зависят от способа изготовления, формы, габаритов образцов для испытаний.

В основу советских норм по каменным конструкциям для определения прочности кладки при осевом сжатии заложена формула Л. И. Онищика, устанавливающая связь между прочностью кирпича (камня) и раствора с прочностью кладки на сжатие. Эмпирические коэффициенты в этой формуле зависят от выбранных методов испытания кладочных материалов. С изменением методов испытаний должны корректироваться и коэффициенты.

2. Сопротивления кладки сжатию в нормах подсчитывались по формуле Л. И. Онищика, где основным способом выравнивания поверхности кирпича служила подливка его раствором. При выравнивании поверхности другими способами следует вводить коэффициент перехода между ними. В противном случае марка кирпича будет отличаться от полученной по методике Л. И. Онищика и при подстановке в таблицы расчетных сопротивлений кладки в [16] можно получить некорректные значения.

Для восстановления взаимосвязи между ГОСТами на испытания и сводом правил в таблицу 6.1 [16] внесены коррективы по назначению расчетных сопротивлений кладки. Для кирпича пластического формования расчетные сопротивления кладки принимаются с понижающим коэффициентом 0,9 при выравнивании поверхности кирпича шлифованием.

Данное решение является компромиссным. Оно позволяет сохранить прежние запасы прочности для каменной кладки, которые были искусственно снижены после выхода ГОСТ [17] и назначении основным способом подготовки поверхности шлифование.

Оптимальным является введение в ГОСТ [17] для кирпича пластического формования коэффициентов перехода от прочности шлифованного кирпича к прочности кирпича с выровненной раствором поверхностью. Способ испытания кирпича с выровненной раствором поверхностью следует считать основным и марку кирпича устанавливать по нему, что должно отражаться в паспорте на изделие.

Для кирпича и камня, выпускаемых со шлифованной поверхностью, это требование не распространяется.

3. Вернуть в ГОСТ [17] требование о назначении марки кирпича по прочности с учетом прочности на изгиб.

4. Сопротивления кладки сжатию в нормах подсчитывались по формуле Л. И. Онищика, где прочность раствора определялась из испытания кубов, изготовленных в формах без дна и устанавливаемых на пористое основание.

В новой редакции ГОСТ принято, что образцы изготавливаются в формах с дном. В этом случае следует вводить коэффициент перехода в таблицы расчетных сопротивлений кладки в [16]. Значения этих коэффициентов требуют уточнения.

5. Приведенные в ГОСТ на испытания кладки [5] типы образцов частично позаимствованы из европейских норм. При этом не учитывается, что при назначении прочности кладки сжатию в российских нормах принимались результаты испытаний столбов определенных габаритов. Испытание стенок наряду со столбами без учета масштабного фактора приводит к некорректным результатам. В [5] следует внести требования по учету масштабного фактора.

Кроме того, рекомендуется учитывать качество кладки опытных образцов («руку каменщика») в соответствии с формулой (4).

6. Следует вернуть в ГОСТ [17] термин «кирпич полусухого формования» и соответствующие требования к нему.

## Список литературы

1. *Онищик Л.И.* Каменные и армокаменные конструкции промышленных и гражданских зданий. Москва-Ленинград: Стройиздат; 1939.
2. *Поляков С.В.* Длительное сжатие кирпичной кладки. Москва: Госстройиздат; 1959.
3. *Ищук М.К.* Роль прочности кирпича на изгиб при сжатии кладки. Строительные материалы. 2018;(8):63–65.
4. *Онищик Л.И.* Нормы проектирования каменных и армокаменных конструкций. В: Нормы проектирования конструкций. 4-я ред. Москва: Машстройиздат; 1949, с. 37–65.
5. ГОСТ 32047-2012. Кладка каменная. Метод испытания на сжатие. Москва: Стандартинформ; 2014.
6. ГОСТ 8462-85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. Москва: Издательство стандартов; 2001.
7. *Порядина Н.А., Серебряная И.А.* Статистический анализ применимости альтернативного метода испытания на прочность при осевом сжатии. В: Инновационные технологии в науке и образовании. Сб. трудов VI Международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону: ДГТУ-ПРИНТ; 2018, с. 187–190.
8. *Деркач В.Н., Галалюк А.В.* Влияние подготовки поверхности кладочного элемента на прочность при сжатии определяемую согласно EN 772-1. Строительная наука и техника. 2010;(5):47–50.
9. *Fódi A.* Effects influencing the compressive strength of a solid, fired clay brick. Periodica Polytechnica Civil Engineering. 2011;55(2):117–128. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2011-2.04>
10. *Сапелин Н.А., Ким Д.И.* Методы определения прочности керамических камней. Технологии бетонов. 2010;(3-4):10–11.
11. *Ищук М.К.* Влияние различных факторов на оценку прочности кладки при сжатии [К вопросу совершенствования норм по каменным конструкциям]. Строительные материалы. 2020;(7):67–75. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-67-75>
12. *Ищук М.К., Айзятуллин Х.А., Черемных В.А., Попов А.А., Макаревич Е.В., Салюкова М.Г., Лежнева Т.Н.* Исследование прочности на сжатие кирпича и камня при различных способах подготовки поверхности опытных образцов. В: Эффективные строительные конструкции: теория и практика. Сборник статей XXI Международной научно-технической конференции. Пенза: Приволжский Дом знаний; 2021, с. 49–54.
13. *Пономарев О.И., Мухин М.А.* Методические рекомендации по методу испытания керамического полнотелого кирпича. Отчет о НИР. Номер государственной регистрации: АААА-Б20-220110690049-4. Москва; 2020.
14. *Пономарев О.И., Мухин М.А., Ветков А.С., Иванова А.Ю.* Влияние шлифования нагружаемой поверхности на прочность кладочных стеновых керамических изделий при сжатии. Вестник НИЦ Строительство. 2021;28(1):74–84. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-74-84](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-74-84)
15. ГОСТ 530-2007. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2007.
16. СП 15.13330.2012. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-22-81\*. Москва: Стандартинформ; 2012.
17. ГОСТ 530-2012. Кирпич и камень керамические. Общие технические условия. Москва: Стандартинформ; 2013.
18. ГОСТ Р 58527-2019. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. Москва: Стандартинформ; 2019.
19. DIN EN 772-1:2016. Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength [internet]. Available at: <https://meganorms.ru/stb-din-en-772-1-2016-05.html>

20. СТБ EN 772-1-2008 (EN 772-1:2000, IDT). Методы испытаний строительных блоков. Часть 1. Определение прочности при сжатии. Минск: Госстандарт: Минсктиппроект; 2008.
21. ГОСТ 5802-86. Растворы строительные. Методы испытаний. Москва: Стандартиформ; 2018.
22. EN 1052-1-2009. Methods of test for masonry – Part 1. Determination of compressive strength [internet]. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/620393/EN%201052-1>

## References

1. *Onishchik L.I.* Stone and reinforced stone structures of industrial and civil buildings. Moscow–Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1939. (In Russian).
2. *Polyakov S.V.* Prolonged compression of brickwork. Moscow: Gosstroyizdat Publ.; 1959. (In Russian).
3. *Ishchuk M.K.* The role of brick bending strength at compression of masonry. *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2018;(8):63–65. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2018-762-8-63-65>
4. *Onishchik L.I.* Norms of design of stone and reinforced stone structures. In: Norms of design of structures. Fourth ed. Moscow: Mashstroizdat Publ.; 1949, pp. 37–65. (In Russian).
5. State Standard 32047-2012. Masonry. Method of compressive test. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
6. State Standard 8462-85. Wall materials. Methods for determination of ultimate compressive and bending strength. Moscow: Publishing standards; 2001. (In Russian).
7. *Ordina N.A., Serebryanskaya I.A.* Statistical analysis of the applicability of an alternative method of strength testing under axial compression. In: Innovative technologies in science and education. Proceedings of the VI International Scientific and Practical Conference. Rostov-on-Don: DSTU-PRINT; 2018, pp. 187–190. (In Russian).
8. *Derkach V.N., Galalyuk A.V.* The effect of surface preparation of a masonry element on compressive strength determined according to EN 772-1. *Stroitel'naya nauka i tekhnika = Construction science and technology*. 2010;(5):47–50. (In Russian).
9. *Fódi A.* Effects influencing the compressive strength of a solid, fired clay brick. *Periodica Polytechnica Civil Engineering*. 2011;55(2):117–128. <https://doi.org/10.3311/pp.ci.2011-2.04>
10. *Sapelin N.A., Kim D.I.* Methods for determining the strength of ceramic stones. *Tekhnologii betonov = Technologies of concrete*. 2010;(3-4):10–11. (In Russian).
11. *Ishchuk M.K.* Influence of different factors on the assessment of strength of masonry at compression (to the question of improvement of norms on masonry constructions). *Stroitel'nye Materialy = Construction Materials*. 2020;(7):67–75. (In Russian). <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2020-782-7-67-75>
12. *Ishchuk M.K., Aizyatullin H.A., Cheremnykh V.A., Popov A.A., Makarevich E.V., Salyukova M.G., Lezhneva T.N.* Investigation of the compressive strength of brick and stone with various methods of surface preparation of prototypes. In: Effective building structures: theory and practice. Collection of articles of the XXI International Scientific and Technical Conference. Penza: Privolzhskii Dom znaniy Publ.; 2021, pp. 49–54. (In Russian).
13. *Ponomarev O.I., Mukhin M.A.* Methodological recommendations on the method of testing ceramic solid bricks. Scientific report. State registration number AAAA-B20-220110690049-4. Moscow; 2020. (In Russian).
14. *Ponomarev O., Mukhin M., Vetkov A., Ivanova A.* The effect of grinding the loaded surface on the strength of masonry wall ceramic products in compression. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021;28(1):74–84. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1\(28\)-74-84](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-1(28)-74-84)
15. State Standard 530-2007. Ceramic bricks and stones. General specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2007. (In Russian).
16. SP 15.13330.2012. Masonry and reinforced masonry structures. Updated version SNiP II-22-81\*. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
17. State Standard 530-2012. Ceramic bricks and stone. General specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. (In Russian).
18. State Standard R 58527-2019. Wall materials. Methods for determination of ultimate compressive and bending strength. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
19. DIN EN 772-1:2016. Methods of test for masonry units – Part 1: Determination of compressive strength [internet]. Available at: <https://meganorms.ru/stb-din-en-772-1-2016-05.html>

- 20.** STB EN 772-1-2008 (EN 772-1:2000, IDT). Test methods for building blocks. Part 1. Determination of compressive strength. Minsk: Gosstandart: Minsktiproekt; 2008. (In Russian).
- 21.** State Standard 5802-86. Mortars. Test methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
- 22.** EN 1052-1-2009. Methods of test for masonry – Part 1. Determination of compressive strength [internet]. Available at: <https://standards.globalspec.com/std/620393/EN%201052-1>

### **Информация об авторе / Information about the author**

**Михаил Карпович Ищук**, д-р техн. наук, заведующий лабораторией реконструкции уникальных каменных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: kamkon@yandex.ru

тел.: +7 (926) 535-20-32; +7 (499) 174-79-96 (83)

**Mikhail K. Ishchuk**, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for the Reconstruction of Unique Stone Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: kamkon@yandex.ru

tel.: +7 (926) 535-20-32; +7 (499) 174-79-96 (83)

# ПРОЧНОСТЬ КЛАДКИ ИЗ КЕРАМИЧЕСКОГО ШЛИФОВАННОГО И НЕШЛИФОВАННОГО КИРПИЧА (СРАВНЕНИЕ РОССИЙСКИХ И ЕВРОПЕЙСКИХ НОРМ)

О.И. ПОНОМАРЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук  
М.А. МУХИН<sup>1</sup>  
О.С. ЧИГРИНА<sup>1</sup>  
А.Ю. ДОЗОРОВА<sup>1,✉</sup>  
С.И. СМИРНОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ООО «Винербергер Кирпич», ул. Русаковская, д. 13, г. Москва, 107140, Российская Федерация

## Аннотация

**Введение.** В последние годы большое внимание уделяется вопросам сокращения трудозатрат и повышения надежности результатов испытаний кладочных керамических стеновых изделий (кирпича, камня и блоков). В работе отмечается, что при определении предела прочности кладки выравнивание опорных поверхностей кирпича выполняется раствором, а при выравнивании опорных поверхностей шлифованием предел прочности кладки искусственно завышается не менее чем на одну марку. Для повышения надежности выводимых зданий и сооружений в примечании 1 к таблице 6.1 СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции» дано указание о необходимости введения соответствующих поправочных коэффициентов при определении прочности кладки. В предыдущей редакции СП значения понижающих коэффициентов были приняты без соответствующих обоснований.

**Цель.** Обоснование снижения расчетных сопротивлений сжатию кладки из керамического кирпича пластического формования (при определении его прочности при сжатии со шлифованием опорных поверхностей) в целях повышения надежности возводимых зданий и сооружений.

**Материалы и методы.** Сравнение нормативных и расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича пластического формования на традиционном растворе по нормам РФ, а также Великобритании, Германии, на основании которых разработаны европейские нормы.

**Результаты.** Проведенное при выполнении данной работы сравнение норм Великобритании, Германии и России показало, что расчетные значения прочности кладки в нормах европейских стран меньше, чем в нормах РФ за счет более высоких коэффициентов запаса.

**Выводы.** Снижение расчетной прочности на сжатие кладки из керамического кирпича пластического формования на 10% (при шлифовании опорных поверхностей для определения прочности на сжатие) признано обоснованным.

**Ключевые слова:** керамический кирпич, шлифование, сжатие, класс, марка, опорная поверхность, нормативная прочность, расчетная прочность, кирпич пластического формования

**Для цитирования:** Пономарев О.И., Мухин М.А., Чигрина О.С., Дозорова А.Ю., Смирнов С.И. Прочность кладки из керамического шлифованного и нешлифованного кирпича (сравнение российских и европейских норм). *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):95–110. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-95-110](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-95-110)

### **Вклад авторов**

Пономарев О.И., Смирнов С.И. – введение, анализ результатов исследований, выводы.  
Мухин М.А., Чигрина О.С., Дозорова А.Ю. – проведение экспериментальных исследований, корректировка статьи.

### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

*Поступила в редакцию 26.06.2024*

*Поступила после рецензирования 08.07.2024*

*Принята к публикации 11.07.2024*

## **STRENGTH OF MASONRY MADE OF CERAMIC BRICK WITH GROUND AND UNGROUND SURFACES (COMPARISON OF RUSSIAN AND EUROPEAN NORMS)**

O.I. PONOMAREV<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

M.A. MUKHIN<sup>1</sup>

O.S. CHIGRINA<sup>1</sup>

A.Yu. DOZOROVA<sup>1</sup>,✉

S.I. SMIRNOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, 2nd Institut'skaya str., 6, bld. 1, Moscow, 109428, Russian Federation*

<sup>2</sup> *LLC Wienerberger, Rusakovskaya St., 13, Moscow, 107140, Russian Federation*

### **Abstract**

*Introduction.* In recent years, much attention has been paid to the issues of reducing labor costs and increasing the reliability of test results of masonry ceramic wall products (brick, stone, and blocks). It is noted that when determining the masonry strength limit, the levelling of brick support surfaces is performed with mortar. However, when levelling the support surfaces by grinding, the masonry strength limit is artificially overestimated by at least one grade. In order to increase the reliability of erected buildings and structures, Note 1 to Table 6.1 of SP 15.13330.2020 "Masonry and reinforced masonry structures" gives an indication of the need to introduce appropriate correction factors in determining the strength of masonry. In the previous version of the SP, the values of reduction factors were adopted without appropriate justifications.

*Aim.* To justify reduction of design compression resistance of masonry made of ceramic soft-mud brick (when determining its compressive strength with grinding of supporting surfaces) in order to increase the reliability of erected buildings and structures.

*Materials and methods.* Comparison of normative and calculated values of the strength of masonry made of ceramic soft-mud brick on conventional mortar according to the norms of the Russian Federation, as well as Britain and Germany, on the basis of which the European norms have been developed.

*Results.* The conducted comparison of British, German, and Russian norms showed that the calculated values of masonry strength given in the norms of European countries are lower than those in the norms of the Russian Federation due to higher safety factors.

*Conclusions.* The decrease in the design compressive strength of masonry made of ceramic soft-mud brick by 10 % (when grinding the supporting surfaces to determine the compressive strength) is recognized as reasonable.

**Keywords:** ceramic brick, grinding, compression, class, grade, support surface, standard strength, design strength, soft-mud brick

**For citation:** Ponomarev O.I., Mukhin M.A., Chigrina O.S., Dozorova A.Yu., Smirnov S.I. Strength of masonry made of ceramic brick with ground and unground surfaces (comparison of Russian and European norms). *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):95–110. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-95-110](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-95-110)

#### **Authors contribution statement**

Ponomarev O.I., Smirnov S.I. – introduction, analysis of research results, conclusions.

Mukhin M.A., Chigrina O.S., Dozorova A.Yu. – experimental studies, article revision.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 26.06.2024*

*Received 08.07.2024*

*Accepted 11.07.2024*

## **Введение**

В последние годы большое внимание уделяется вопросам сокращения трудозатрат и повышения надежности результатов испытаний кладочных керамических стеновых изделий (кирпича, камня и блоков).

В частности, большое внимание уделяется оценке эффективности применения метода шлифования нагружаемой поверхности при определении прочности кладочных керамических изделий на сжатие.

В этих целях в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» были проведены сравнительные исследования прочности керамических изделий, испытанных традиционным методом (с выравниванием опорных поверхностей образцов раствором) и методом с выравниванием опорных поверхностей шлифованием.

Результаты испытаний показывают, что в случае полнотелых изделий или изделий с небольшой пустотностью прочность образцов при сжатии, отобранных из одной и той же партии, отличается на 1–2 марки (в пользу шлифованных изделий).

При этом прочность образцов имела небольшой разброс и, как было уже отмечено, превышала прочность образцов, опорные поверхности которых выравнивались раствором, не менее чем на одну марку.

В связи с этим в табл. 6.1 СП 15.13330.2020 [1] в примечании 1 сделано указание, что при определении расчетного сопротивления сжатию кладки марки керамического кирпича и камня пластического формования принимаются по результатам испытаний образцов с выравниванием опорных поверхностей раствором. При других способах выравнивания опорных поверхностей марка (прочность) кирпича или камня, приведенная в указанной таблице, принимается с учетом коэффициента перехода  $K$  в соответствии ГОСТ Р 58527-2019 [2].

## Анализ результатов испытаний

Отметим, что по результатам испытаний наибольшая прочность кладочных изделий получена при выравнивании опорных (нагружаемых) поверхностей методом шлифования «насухо» (рис. 1а). Этот факт указан профессором Л.И. Онищиком. В частности, в его монографии «Каменные конструкции» [3] указано, что наибольшая прочность достигается при кладке кирпича «насухо» при тщательно отшлифованных поверхностях (и стыках, рис. 1б). Однако такой метод возведения кладки неприемлем в связи с большой трудоемкостью обеспечения качественной перевязки кладочных изделий (кирпича или камня). Поэтому на практике в случае применения шлифованных керамических изделий, а также силикатных и ячеистобетонных изделий кладка возводится с применением тонкого слоя раствора и клеевых составов, позволяющих значительно снизить концентрацию напряжений в кладочных изделиях в зоне перевязки.

При испытаниях на сжатие кладочных стеновых материалов – кирпича, камня, растворных кубиков, напряженно-деформированное состояние (НДС) испытываемых образцов аналогично НДС бетонных кубиков при их испытании на сжатие.

Следует отметить, что внедрение шлифования при испытании бетонных кубиков в конце 70-х годов XX века также проходило со значительными трудностями. Но в настоящее время этот метод используется в стандартах по определению прочности бетона.

В ГОСТ 10180-2012 [4] подобно изложены требования как к проведению испытаний, так и к размерам, форме, количеству и подготовке испытываемых образцов. В приложении Е приведены примеры удовлетворительных и неудовлетворительных разрушений образцов (рис. 2).

В п. 7.2.4 [4] указано, что в случае разрушения образца по одной из неудовлетворительных схем результат испытаний не учитывается.

Аналогичная картина разрушения имеет место при испытании образцов кладочных изделий, в том числе керамического кирпича и камней пластического формования.

Примеры разрушения образцов кирпича показаны на рис. 3.

Анализируя НДС испытываемых образцов, следует отметить, что при испытании образцов на сжатие продольным деформациям всегда сопутствуют поперечные деформации. При шлифованных опорных поверхностях поперечные деформации испытываемых образцов меньше за счет сил трения между плитой пресса и образцами, поэтому разрушающая нагрузка будет больше (рис. 4а). А при испытании образцов с выравниванием опорных

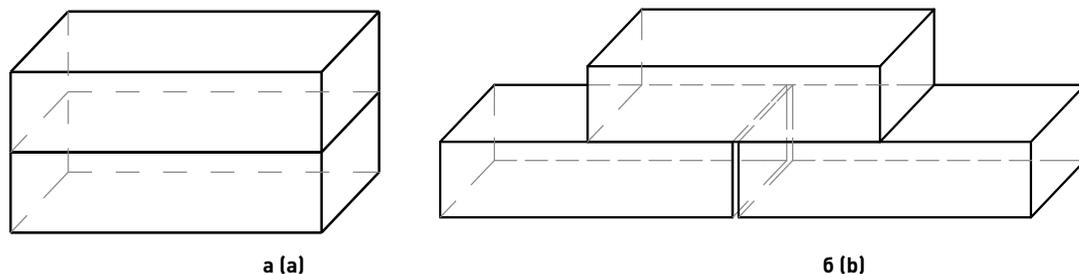
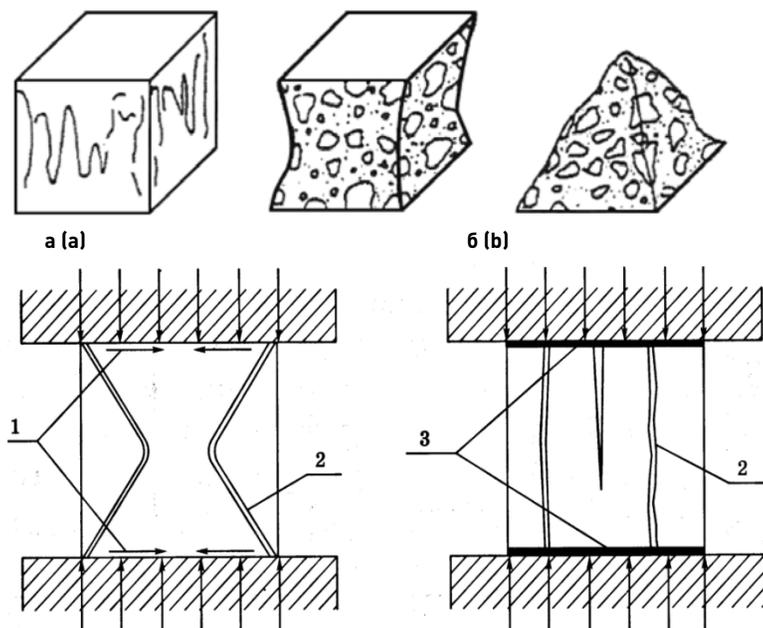


Рис. 1. Кладка «насухо» при выравнивании опорных поверхностей методом шлифования: а – фрагмент кладки без перевязки; б – фрагмент кладки с перевязкой

Fig. 1. Dry-brick building when leveling brick support surfaces by grinding: a – masonry fragment without dressing; b – masonry fragment with dressing



**Рис. 2.** Характер разрушения бетонных кубов при испытаниях на сжатие при различных коэффициентах трения по опорным поверхностям: *a* – при наличии трения по опорным поверхностям; *b* – при отсутствии трения по опорным поверхностям; 1 – силы трения; 2 – характер разрушения; 3 – смазка

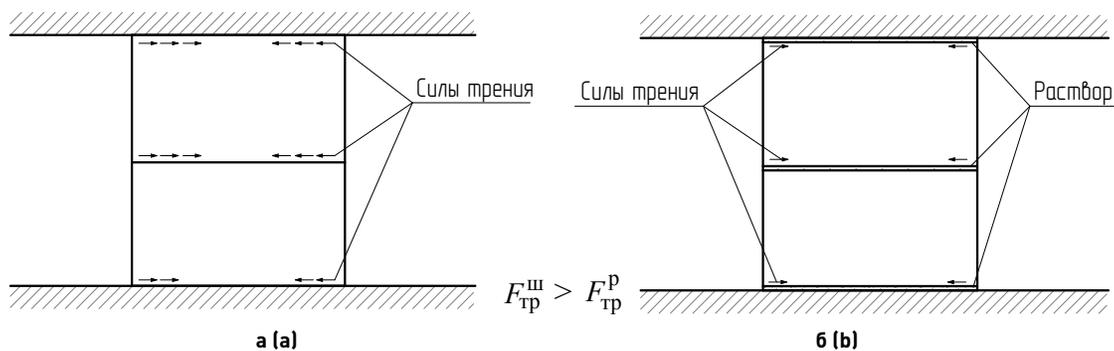
**Fig. 2.** Failure character of concrete cubes during compression tests at different friction coefficients on supporting surfaces: *a* – in the presence of friction on supporting surfaces; *b* – in the absence of friction on supporting surfaces; 1 – friction forces; 2 – fracture character; 3 – lubrication



**Рис. 3.** Характер разрушения образцов кладочных изделий в прессе  
**Fig. 3.** Fracture pattern of masonry specimens in the press

поверхностей раствором разрушающие нагрузки будут меньше, чем при испытании шлифованных образцов (без раствора), так как силы трения между плитой пресса и поверхностью образцов будут меньше при деформируемом слое раствора (рис. 4б).

В целях снижения трудозатрат и разброса в результатах испытаний в странах ЕС при определении прочности керамического кирпича или камня несколько лет назад в качестве основного был принят метод шлифования опорных поверхностей, а в качестве альтернативного – метод выравнивания опорных поверхностей раствором марки М300 или выше.



**Рис. 4.** Схема испытания кирпича на сжатие, где  $F_{тр}^{ш}$  – силы трения в зоне шлифованных поверхностей,  $F_{тр}^p$  – сила трения на границе кирпича и растворного шва: *a* – образец со шлифованными поверхностями; *b* – образец с растворным швом

**Fig. 4.** Brick compression test scheme, where  $F_{тр}^{ш}$  – friction forces in the area of ground surfaces,  $F_{тр}^p$  – friction force at the brick and mortar joint boundary: *a* – sample with ground surfaces; *b* – sample with mortar joint

Такой подход к испытанию прочности кирпича на сжатие, безусловно, может быть использован. Однако его применение в каждой стране должно быть обосновано. В национальных нормах и стандартах должна быть внесена соответствующая корректировка.

Если прочность кирпича искусственно завышается, то в целях обеспечения (сохранения) надежности возводимых конструкций расчетная прочность кладки должна быть уменьшена.

В частности, в российских нормах прочность кладки определяется по формуле (1) профессора Л. И. Онищика:

$$R_k = A \times R_1 \times \left( 1 - \frac{a}{b + \frac{R_2}{2 \times R_1}} \right) \times \gamma, \tag{1}$$

где  $R_k$  – предел прочности кладки при сжатии;

$A$  – конструктивный коэффициент (безразмерный), зависящий от прочности и вида камня;

$R_1$  и  $R_2$  – соответственно пределы прочности камня и раствора при сжатии;

$a$  и  $b$  – эмпирические безразмерные коэффициенты, зависящие от вида кладки;

$\gamma$  – поправочный коэффициент для кладок на растворах низких марок.

В этой формуле было предусмотрено определение прочности кирпича  $R_1$  в соответствии с требованиями ГОСТ 8462-85 [5] на образцах, изготовленных из двух половинок или из двух целых кирпичей на растворе заданной рецептуры (приложение 2 [5]): цемент М400; песок, просеянный через сито с сеткой № 1,25; (В/Ц = 0,40–0,42).

При такой рецептуре прочность раствора соответствует М150–М200 при выдерживании образцов при температуре  $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$  в течение 3 суток.

Следует отметить, что все методы испытаний условны. В кладке кирпич находится в других условиях, чем при испытаниях в прессе. В кладке кирпич «обжат». Использование метода выравнивания опорных поверхностей раствором было принято в целях максимального приближения условий испытаний образцов к работе кладочных материалов в конструкциях зданий.

Полученные с использованием формулы (1) расчетные сопротивления прочности кладки (при различных значениях прочности кирпича, камня, блоков и раствора) приведены

в табл. 6.1 – 6.10 СП 15.13330.2020 [1] для разных видов кладочных стеновых изделий. В частности, для керамического кирпича пластического формования пустотностью до 27% расчетные сопротивления кладки указаны в табл. 6.1 [1].

В настоящее время в целях гармонизации российских и европейских нормативных документов и стандартов в изменениях к ГОСТ Р 58527-2019 [2] (взамен ГОСТ 8462-85 [5]) требуется при подготовке раствора для изготовления образцов для определения прочности при сжатии кирпича и камня применять повышенную марку цемента – М500 (вместо М400), что соответственно увеличивает марку раствора, склеивающего образцы, до М300 и выше.

## Сравнение расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича пластического формования на традиционном растворе по нормам Великобритании, Германии и РФ

Сравнение прочности кладки при сжатии проведены по результатам сопоставления нормативных и расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича пластического формования на тяжелых растворах (растворах общего назначения), приведенных в СП 15.13330.2020 (табл. 6.1) [1], DIN 1053-100 (табл. 4) [6], to Eurocode 6: Design of masonry structures [7] (рис. 5).

При сравнении были учтены следующие факторы.

Необходимо отметить, что в нормах Великобритании указана прочность кладки на двух типах стен, приведенных на рис. 6.

На рис. 6а показана кладка стены из кирпича или камня без продольного шва – с перевязкой только в продольном направлении. На рис. 6б приведены примеры двух видов кладки стен с продольным швом – с перевязкой кладочных изделий в поперечном и продольном направлениях.

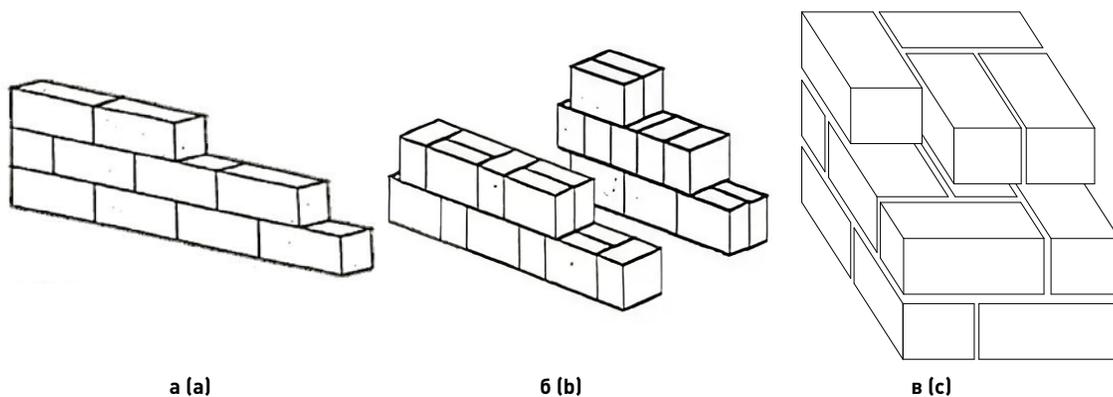


а (а)

б (б)

в (с)

Рис. 5. Нормативные документы: а – DIN 1053-100 [6]; б – СП 15.13330.2020 [1]; в – Eurocode 6 [7]  
Fig. 5. Normative documents: а – DIN 1053-100 [6]; б – SP 15.13330.2020 [1]; в – Eurocode 6 [7]



**Рис. 6.** Схемы кладки в соответствии с с нормами Великобритании и России: а – кладка без продольного шва – с перевязкой только в продольном направлении; б – кладка с продольным швом и поперечной перевязкой; в – кладка столба  
**Fig. 6.** Schemes of masonry in accordance with British and Russian norms: a – masonry without longitudinal joint – with dressing only in longitudinal directions; b – masonry with longitudinal joint and transverse dressing; c – masonry columns

Проведенные испытания показали, что прочностные характеристики этих кладок существенно отличаются. Прочность кладки при сжатии без продольного шва и без поперечной перевязки на 23–24 % превышает прочность кладки с продольным швом и поперечной перевязкой.

В соответствии с российскими стандартами испытания кладки на прочность проводятся на столбах с поперечной и продольной перевязкой. Сравнение результатов испытаний показало, что прочность кладки стенок без продольного шва и без поперечной перевязки превышает прочность кладки на столбах (рис. 6в) на 19–20 %.

Сравнение проведено по нормативным и расчетным значениям прочности кладки с продольным швом и поперечной перевязкой (рис. 6б, в).

Таблица 1

**Стены с продольным швом: кирпичи группы 1 стандартного формата размером 65 мм (высота) × 102 мм (толщина)**

Table 1

**Walls with longitudinal joint: 65 mm (height) × 102 mm (thickness) standard size bricks of group 1**

Обозначение марки раствора		Среднее (не нормализованное) значение прочности кирпича на сжатие, Н/мм <sup>2</sup> , по BS EN 771-1 [8]					
в Великобритании	1996-1-1	5	10	15	20	30	40
(i)	M12	2,1	3,8	5,0	6,1	8,1	10,0
(ii)	M6	1,9	3,1	4,1	5,0	6,6	8,1
(iii)	M4	1,7	2,7	3,6	4,4	5,9	7,2
(iv)	M2	1,4	2,2	2,9	3,6	4,8	5,8

Примечание:  $\delta = 0,85$ ,  $K = 0,80 \times 0,50$ , т.е. толщина стены равна длине кирпича.

Note:  $\delta = 0.85$ ,  $K = 0.80 \times 0.50$ , i.e. the wall thickness is equal to the length of the brick.

Таблица 2

**Нормативные значения прочности кладки из керамического кирпича (гр. 1). Кладка без продольного шва без поперечной перевязки (рис. 6а)**

Table 2

**Normative values for the strength of ceramic brick masonry (Group 1). Masonry without longitudinal joints without transverse dressing (Fig. 6a)**

Класс прочности кирпича/ ближайшая марка (прочность, МПа)	Стандартный кладочный раствор, Н/мм <sup>2</sup>			
	II M2,5 (M25)	Ia M5 (M50)	III M10 (M100)	IIIa M20 (M200)
4/M50 (60,7)	2,2	2,5	2,8	
6/M75 (91,1)	2,8	3,1	3,7	
8/M100 (121,4)	3,1	3,7	4,4	
10/M150 (151,7)	3,4	4,4	5,0	
12/M200 (182,1)	3,7	5,0	5,6	6,0
16/M250 (242,8)	4,4	5,5	6,6	7,7
20/M300 (303,5)	5,0	6,0	7,5	9,4
28/M400 (424,9)	5,6	7,2	9,4	11,0
36/M500 (546,3)			11,0	12,5

Таблица 3

**Нормативные значения прочности кладки из кирпича всех видов и керамических камней со щелевидными вертикальными пустотами шириной до 12 мм, пустотностью до 27%**

Table 3

**Normative values of masonry strength made of all types of brick and ceramic stone with slit-shaped vertical voids up to 12 mm wide, with voids of up to 27%**

Марка кирпича или камня	Нормативные сопротивления, R, МПа, сжатию кладки из кирпича всех видов и керамических камней с щелевидными вертикальными пустотами шириной до 12 мм при высоте ряда кладки 50–150 мм на тяжелых растворах									
	при марке раствора								при прочности раствора	
	200	150	100	75	50	25	10	4	0,2	нулевой
300	7,8	7,2	6,6	6	5,6	5	4,4	3,6	3,4	3
250	7,2	6,6	6	5,6	5	4,4	3,8	3,2	3	2,6
200	6,4	6	5,4	5	4,4	3,6	3,2	2,8	2,6	2
150	5,2	2,4	4,4	4	3,6	3	2,6	2,4	2	1,6
125	–	4,4	4	3,8	3,4	2,8	2,4	2,2	1,8	1,4
100	–	4	3,6	3,4	3	2,6	2	1,8	1,6	1,2
75	–	–	3	2,8	2,6	2,2	1,8	1,4	1,2	1
50	–	–	–	2,2	2	1,8	1,4	1,2	1	0,7
35	–	–	–	1,8	1,6	1,4	1,2	0,9	0,8	0,5

В табл. 1–3 приведены нормативные значения прочности кладки из керамического кирпича пластического формования пустотностью до 27% по нормам Великобритании, Германии и РФ.

В табл. 4–5 приведены значения коэффициента  $\gamma_M$  для предельного состояния по несущей способности по нормам Великобритании и Германии.

В табл. 2 (немецкие нормы) указаны значения класса кирпича по прочности и соответствующая марка.

Таблица 4

**Значения  $\gamma_M$  для предельного состояния по несущей способности по немецким нормам**

Table 4

**Values of  $\gamma_M$  for bearing capacity limit state according to German norms**

Материал		$\gamma_M$					Material		$\gamma_M$				
		Класс							Klasse				
		1	2	3	4	5			1	2	3	4	5
A	Кладка из:						A	Mauerwerk aus:					
	камней и блоков категории I на кладочном растворе по оценке пригодности <sup>a)</sup>	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5		Steinen der Kategorie I und Mörtel nach der Eignungsprüfung <sup>a)</sup>	1,5	1,7	2,0	2,2	2,5
B	камней и боков категории I на предписанном по рецептуре кладочном растворе <sup>b)</sup>	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	B	Steinen der Kategorie I und Rezeptmörtel <sup>b)</sup>	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
C	камней и боков категории II <sup>a), b), e)</sup>	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0	C	Steinen der Kategorie II <sup>a), b), e)</sup>	2,0	2,2	2,5	2,7	3,0
D	Анкеровка арматурной стали	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	D	Verankerung von Bewehrungsstahl	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
E	Арматурная сталь и сталь для напряженных элементов	1,15					E	Bewehrungsstahl und Spannstahl	1,15				
F	Вспомогательные элементы <sup>c), d)</sup>	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7	F	Ergänzungsbauteile <sup>c), d)</sup>	1,7	2,0	2,2	2,5	2,7
G	Перекрышки по EN 845-2	От 1,5 до 2,5					G	Stürze nach EN 845-2	1,5 bis 2,5				
<sup>a)</sup> Требования к раствору по оценке пригодности установлены в EN 998-2 и EN 1996-2. <sup>b)</sup> Требования к раствору по рецепту установлены в EN 998-2 и EN 1996-2. <sup>c)</sup> Заявленные значения являются средними значениями. <sup>d)</sup> При учете изменений прочности материала вследствие влажностных воздействий распространяется также $\gamma_M$ . <sup>e)</sup> Если коэффициент вариации блоков категории II не более 25%.						<sup>a)</sup> Anforderungen an Mörtel nach Eignungsbewertung sind in EN 998-2 und EN 1996-2 angegeben. <sup>b)</sup> Anforderungen an Rezepturlösung sind in EN 998-2 und EN 1996-2 angegeben. <sup>c)</sup> Deklarierte Werte sind Mittelwerte. <sup>d)</sup> Abdichtungen gegen Feuchtigkeit sind ebenfalls mit $\gamma_M$ abgedeckt. <sup>e)</sup> Sofern der Variationskoeffizient der Steine nach Kategorie II nicht größer als 25 % ist.							

В табл. 3 (российские нормы) приведены нормативные значения прочности кладки, подсчитанные по формуле проф. Л. И. Онищика.

Проведенное при выполнении данной работы сравнение норм Великобритании, Германии и России показало, что расчетные значения прочности кладки в нормах европейских стран меньше, чем в нормах РФ за счет более высоких коэффициентов запаса  $\gamma_M$ , принятых в EN.

Таблица коэффициентов  $\gamma_M$  для предельного состояния по несущей способности в немецких нормах соответствует таблицам, приведенным в EN.

В нормах Великобритании даны более высокие коэффициенты запаса, а также учитывается класс контроля исполнения работ.

Таблица 5

Значения  $\gamma_M$  для предельного состояния по несущей способности по нормам Великобритании

Table 5

Values of  $\gamma_M$  for bearing capacity limit state according to British Standards

Материал	Класс контроля исполнения	
	1 *1)	2 *1)
Каменная кладка: В состоянии осевого сжатия или сжатия с изгибом: Неармированная каменная кладка, сложенная из блоков категории:		
I	2,3 *2)	2,7 *2)
II	2,6 *2)	3,0 *2)
Армированная каменная кладка, сложенная из блоков категории:		
I	2,0 *2)	*3)
II	2,3 *2)	*3)
При напряжениях изгиба блоки категории I и II		
	2,3 *2)	2,7 *2)
При напряжениях сдвига:		
Неармированная каменная кладка из блогов категории I и II		
	2,5 *2)	2,5 *2)
Армированная каменная кладка из блогов категории I и II		
	2,0 *2)	*3)
Стальные и иные элементы:		
Анкеровка стальной арматуры		
	1,5 *4)	*3)
Обычная и напрягаемая арматура		
	1,15 *4)	*3)
Вспомогательные элементы:		
Анкерные связи		
	3,5 *4)	3,5 *2)
Скобы		
	1,5 *5)	1,5 *5)
Перемиčky в соответствии со стандартом EN 845-2	См. Национальное положение к стандарту BS EN 845-2	См. Национальное положение к стандарту BS EN 845-2
Примечание		

Пояснение к таблицам

В EN, в т. ч. в нормах Великобритании и Германии (табл. 1 и 2), приняты следующие обозначения для кладочных изделий и условий эксплуатации.

- Категория 1 – кладочные изделия с декларированной и гарантированной (95%) прочностью.
- Категория 2 – кладочные изделия с декларированной, но не гарантированной прочностью.
- Группа 1 кирпича и камня керамического пустотностью до 25%.

В немецких нормах, так же, как и в EN, при определении  $\gamma_M$  учитывается класс окружающей среды (условия эксплуатации) – 1–5.

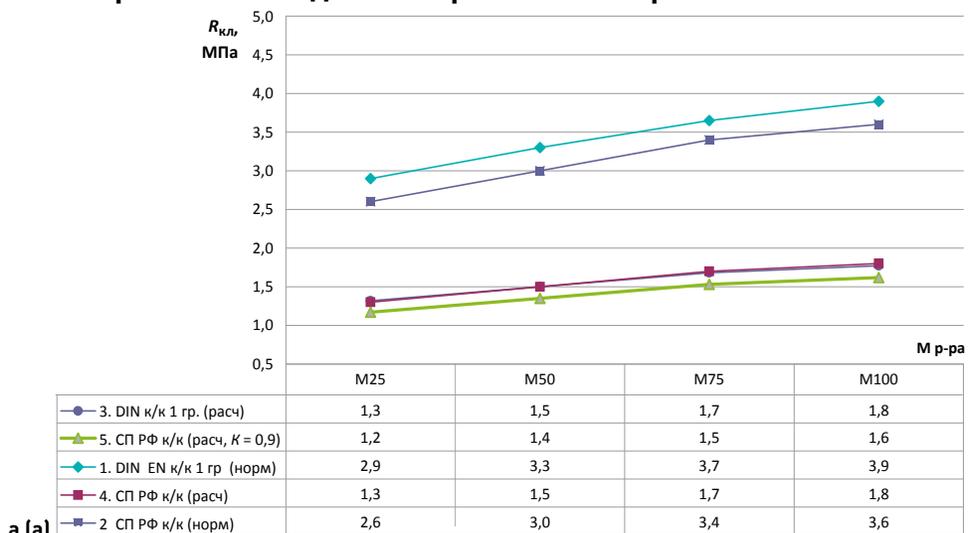
Приготовленный по оценке пригодности кладочный раствор учитывает требования к условиям эксплуатации. Состав и технологию изготовления такого раствора производитель подбирает таким образом, чтобы достигнуть определенных свойств и величин – в основном прочность, учитывая также паропроницаемость, морозостойкость, теплопроводность.

Кроме того, при определении прочности кладки учитывались различные размеры образцов при определении прочности раствора, используемые в российских и европейских нормах.

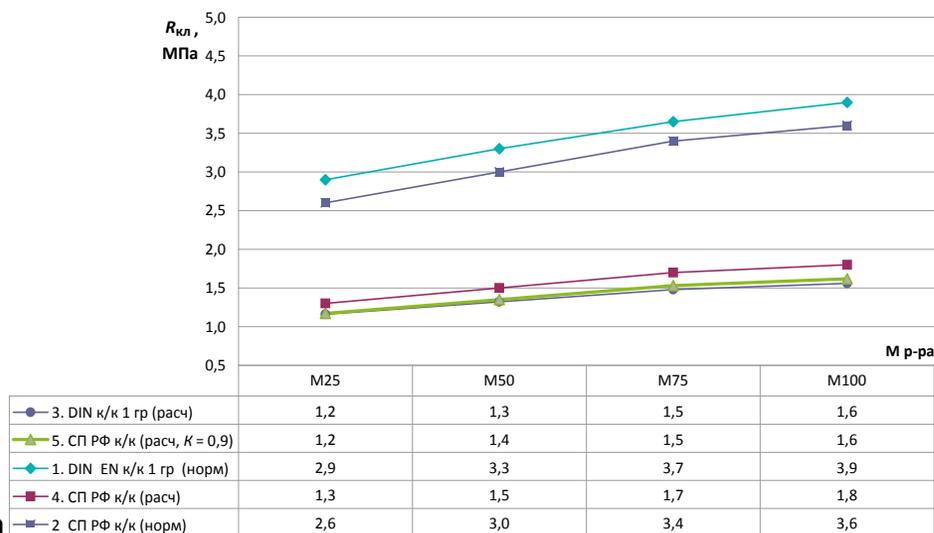
Приготовленный по рецептуре кладочный раствор определяется как раствор с заданными пропорциями. Свойства раствора определяют пропорциями составляющих компонентов, затем по изготовленным образцам определяют прочность раствора.

Сравнение проводится по результатам испытаний образцов с продольным швом (с поперечной перевязкой рядов кладки).

### Сравнение прочности кладки по нормам РФ и Германии



а (a)



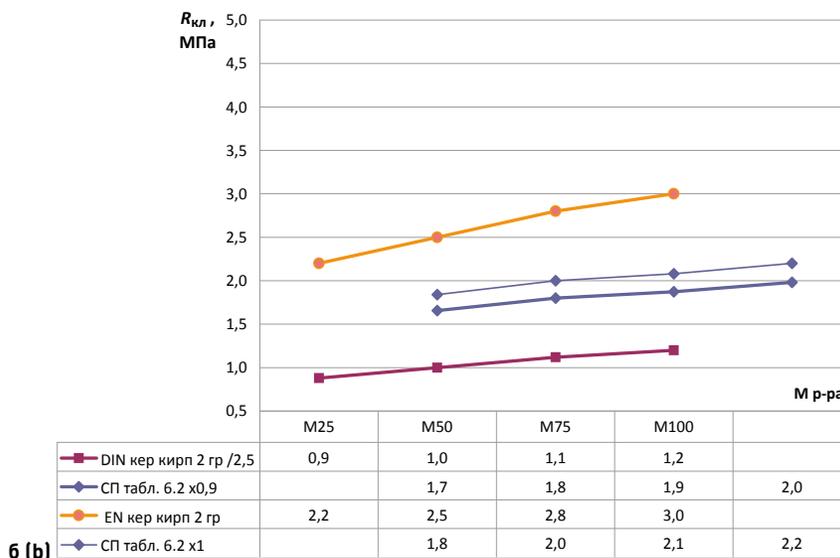
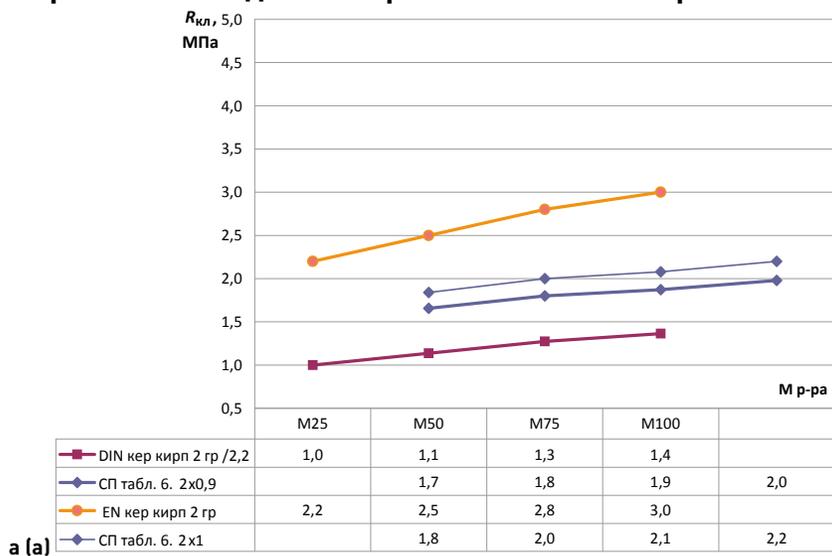
б (b)

**Рис. 7.** а – кладочные изделия категории 1 при декларированной и гарантированной (95%) прочности; б – кладочные изделия категории 2 при декларированной, но не гарантированной прочности  
**Fig. 7.** а – masonry products of category 1 at declared and guaranteed (95%) strength; б – masonry products of category 2 at declared but not guaranteed strength

Условные обозначения к рис. 7

1. Кривая нормативной прочности кладки из керамического кирпича 1 группы пустотностью до 25% по немецким нормам.
2. Кривая нормативной прочности кладки из керамического кирпича пустотностью до 27% по нормам РФ.
3. Кривая расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича 1 группы пустотностью до 25% по немецким нормам (коэффициент надежности 2,2, рис. 7а, 2,5 на рис. 7б).
4. Кривая расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича пустотностью до 27% по нормам РФ.
5. Кривая расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича пустотностью до 27% по нормам РФ с понижающим коэффициентом K = 0,9.

## Сравнение прочности кладки по нормам РФ и Великобритании



**Рис. 8.** а – кладочные изделия категории 1 при декларированной и гарантированной (95%) прочности; б – кладочные изделия категории 2 при декларированной, но не гарантированной прочности  
**Fig. 8.** а – masonry products of category 1 at declared and guaranteed (95%) strength; б – masonry products of category 2 at declared but not guaranteed strength

Условные обозначения к рис. 8

1. Кривая нормативной прочности кладки из керамического кирпича 1 группы пустотностью до 25% по нормам Великобритании.
2. Кривая нормативной прочности кладки из керамического кирпича пустотностью до 27% по нормам РФ.
3. Кривая расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича 1 группы пустотностью до 25% по нормам Великобритании (коэффициент надежности 2,3, рис. 8а, 2,6 на рис. 8б).
4. Кривая расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича пустотностью до 27% по нормам РФ.
5. Кривая расчетных значений прочности кладки из керамического кирпича пустотностью до 27% по нормам РФ с понижающим коэффициентом  $K = 0,9$ .

При построении нормативных и расчетных кривых, наглядно характеризующих изменение значений прочности кладки в зависимости от прочности кирпича и раствора по нормам Великобритании, Германии и РФ, приняты следующие положения:

– Сравнение проведено по нормативным и расчетным значениям прочности кладки с продольным швом и поперечной перевязкой кладки (рис. 7, 8).

– В нормах Великобритании приведены значения кладки с продольным швом (с поперечной перевязкой) (табл. 1). Сравнение показывает, что прочность кладки без поперечной перевязки (без продольного шва) в 1,23–1,25 раза выше прочности кладки, в которой имеется продольная и поперечная перевязки.

– При определении нормативных значений прочности кладки с продольным швом и с поперечной перевязкой по немецким нормам (табл. 2) класс кирпича по прочности пересчитан в марку.

– Проведена корректировка прочности кладки по нормам по нормам РФ, Германии и Великобритании с учетом различных размеров образцов при определении прочности раствора.

– Сравнение проведено на примере прочности кладки из керамического кирпича пластического формования М100 пустотностью до 27 %.

## Заключение

На рис. 7 и 8 видно, что в нормах РФ расчетные значения прочности кладки для кладки из кирпича категории 2 (соответствующей российским нормам) с учетом коэффициентов надежности по материалу  $\gamma_M$  выше кривых расчетных значений прочности кладки, используемых в европейских странах (в т. ч. в нормах Германии и Великобритании).

В нормах РФ значения прочности кладки, выполненной из кирпича категории 2 (соответствующей российским стандартам), с учетом коэффициентов надежности по материалу  $\gamma_M$  превышают расчетные значения прочности, приведенные в европейских стандартах (в т. ч. в нормах Германии и Великобритании). В российских нормах приняты более высокие расчетные значения прочности кладки.

Принятое решение в целях повышения надежности возводимых зданий и сооружений и гармонизации российских и европейских норм и стандартов о снижении на 10% расчетных сопротивлений сжатию кладки из керамического кирпича пластического формования (при определении его прочности при сжатии со шлифованием опорных поверхностей) следует считать обоснованным.

## Список литературы

1. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Москва: Минстрой России; 2020.
2. ГОСТ Р 58527-2019. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. Москва: Стандартинформ; 2019.
3. *Онищик Л.И.* Каменные конструкции. Москва: Стройиздат; 1939.
4. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. Москва: Стандартинформ; 2013.
5. ГОСТ 8462-85. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. Москва: Издательство стандартов; 2001.
6. DIN 1053-100. Masonry – Part 100: Design on the basis of semi-probabilistic safety concept [internet]. Available at: <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-1053-100/91679219>

7. EN 1996-1-1. Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1996.1.1.2005.pdf>.
8. ГОСТР 57347-2016 / EN 771-1:2011. Кирпич керамический. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2017.

## References

1. SP 15.13330.2020. Masonry and reinforced masonry structures. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
2. State Standard R 58527-2019. Wall materials. Methods for determination of ultimate compressive and bending strength. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
3. *Onishchik L.I.* Stone constructions. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1939. (In Russian).
4. State Standard 10180-2012. Concretes. Methods for strength determination using reference specimens. Moscow: Standartinform Publ.; 2013. (In Russian).
5. State Standard 8462-85. Wall materials. Methods for determination of ultimate compressive and bending strength. Moscow: Publishing House of Standards; 2001. (In Russian).
6. DIN 1053-100. Masonry – Part 100: Design on the basis of semi-probabilistic safety concept [internet]. Available at: <https://www.dinmedia.de/en/standard/din-1053-100/91679219>
7. EN 1996-1-1. Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures [internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1996.1.1.2005.pdf>.
8. EN 771-1:2011. Specification for masonry units — Part 1: Clay masonry units, IDT. Moscow: Standartinform Publ.; 2017. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

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

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

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

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

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

**Olga S. Chigrina**, Head of Sector of the Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: schigrin@mail.ru

tel.: +7 (903) 172-98-97

**Александра Юрьевна Дозорова**✉, инженер лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий (№ 7), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: alexderges@yandex.ru

тел.: +7 (499) 170-10-88

**Alexandra Yu. Dozorova**✉, Engineer of the Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: alexderges@yandex.ru

tel.: +7 (499) 170-10-88

**Сергей Игоревич Смирнов**, продакт-менеджер, ООО «Винербергер Кирпич», Москва

e-mail: sergey.smirnov@porotherm.ru

тел.: +7 (495) 280-33-01

**Sergey I. Smirnov**, Product manager, LLC "Wienerberger", Moscow

e-mail: sergey.smirnov@porotherm.ru

tel.: +7 (495) 280-33-01

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.012.1/2

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-111-123](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-111-123)

EDN: DCMAEH

# УСИЛЕНИЕ КИРПИЧНОЙ КЛАДКИ ИНЪЕКЦИЕЙ МЕТИЛМЕТАКРИЛАТА

Е.М. ИЩУК

М.К. ИЩУК<sup>✉</sup>, д-р техн. наук

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

## Аннотация

**Введение.** Усиление кирпичной и каменной кладки инъекцией раствора под давлением является одним из основных способов восстановления монолитности кладки, восстановления, а в ряде случаев – и повышения несущей способности. В настоящей работе приводятся результаты проведенных исследований прочности кладки, усиленной инъекцией метилметакрилата, которые входят в комплексную программу, начатую еще в 2004 г. и продолжающуюся по настоящее время. За счет высокой проникающей способности метилметакрилата усиление им кладки с небольшим раскрытием трещин может найти широкое применение.

**Цель.** Оценка эффективности усиления инъекцией метилметакрилата кладки.

**Материалы и методы.** Экспериментальные исследования проводились в два этапа. На первом испытывались на сжатие образцы кладки, изготовленные в виде столбов. На втором в образцы с образовавшимися трещинами производилась инъекция метилметакрилата под давлением. Усиленные таким образом образцы испытывались вновь с целью оценки величины коэффициента увеличения прочности.

**Результаты.** Исследовалось распространение метилметакрилата по кладке при его инъекции под давлением, а также по отдельным образцам кирпича и раствора без давления. Показано, что технология усиления кладки инъекцией метилметакрилата существенно отличается от технологии усиления бетона, где возможно обеспечить высокое давление и благодаря этому хорошее распространение по телу бетона.

**Выводы.** Инъекция метилметакрилата в кладку с множественными силовыми трещинами позволяет повысить ее несущую способность не менее чем в 1,2 раза.

Результаты исследований использованы при разработке нормативных документов по усилению каменных конструкций.

**Ключевые слова:** кирпичная кладка, усиление кладки инъекцией метилметакрилата, прочность и деформации кладки, трещины, распространение метилметакрилата по кладке, испытание на сжатие, рекомендации по усилению, коэффициент увеличения прочности усиленной кладки

**Для цитирования:** Ищук Е.М., Ищук М.К. Усиление кирпичной кладки инъекцией метилметакрилата. Вестник НИЦ «Строительство». 2024;42(3):111–123. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-111-123](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-111-123)

## Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

## Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 03.07.2024

Поступила после рецензирования 20.07.2024

Принята к публикации 25.07.2024

# BRICK MASONRY REINFORCEMENT WITH METHYL METHACRYLATE INJECTION

E.M. ISHCHUK

M.K. ISHCHUK✉, Dr. Sci. (Engineering)

*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*

## Abstract

*Introduction.* Structural reinforcement of brick and stone masonry by grouting materials under pressure is an efficient approach to restoring the masonry integrity, and, in some cases, improving its bearing capacity. This paper presents the results of research studies into the strength of a masonry structure reinforced by methyl methacrylate injection. This research is part of a larger project, which was launched in 2004 and continues to date. Due to the high penetrating ability of methyl methacrylate, reinforcement of masonry structures with small crack opening seems highly promising.

*Aim.* Evaluation of the effectiveness of methyl methacrylate injection for masonry reinforcement.

*Materials and methods.* The experimental studies were carried out in two stages. At the first stage, masonry specimens manufactured in the form of columns were subjected to compression tests. At the second stage, methyl methacrylate was injected under pressure into the specimens with formed cracks. The as-reinforced specimens were tested again in order to evaluate their strength increase factor.

*Results.* The distribution of methyl methacrylate throughout masonry when injected under pressure, as well as through individual brick and mortar specimens without pressure, was studied. It is shown that the technology of masonry reinforcement by methyl methacrylate differs significantly from that of concrete consolidation, where higher pressures contribute to its more even distribution over the concrete body.

*Conclusions.* Injection of methyl methacrylate into masonry with multiple load cracks can increase its load-bearing capacity by at least 1.2 times.

The results of research were used in the development of normative documents on reinforcement of masonry structures.

**Keywords:** masonry, brick masonry reinforcement with methyl methacrylate injection, brickwork strength and deformations, cracks, methyl methacrylate distribution in brickwork, compression test, reinforcement recommendations, reinforced brickwork strength increase factor

**For citation:** Ishchuk E.M., Ishchuk M.K. Brick masonry reinforcement with methyl methacrylate injection. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):111–123. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-111-123](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-111-123)

## Authors contribution statement

All authors have contributed equally to the work and this publication.

## Funding

No funding support was obtained for the research.

## Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

*Received 03.07.2024*

*Revised 20.07.2024*

*Accepted 25.07.2024*

## Введение

Усиление кирпичной и каменной кладки инъекцией раствора под давлением является одним из основных способов восстановления монолитности кладки, а в ряде случаев – и повышения несущей способности.

В рекомендациях ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко [1, 2], разработанных на основе экспериментов В. П. Ворониной [3] и действовавших в развитие СНиП II-22-81\* «Каменные и армокаменные конструкции» [4], рассматривалось усиление кладки с трещинами инъекцией раствора под давлением. Для кладки из керамического кирпича на растворе прочностью 3,9–5,7 МПа при усилении инъекцией цементно-песчаных растворов увеличение прочности кладки принято в 1,13–1,25 раза. При усилении полимерцементными растворами рост прочности кладки принимается в 1,25–1,37 раза при прочности кладочного раствора 5,2–7,9 МПа. При усилении кладки с трещинами на растворе прочностью 7,3–11,5 МПа и раствором на основе эпоксидной смолы увеличение прочности кладки принято в 1,6–1,8 раза.

В 1991 г. были выпущены методические указания по технологии инъекционного укрепления каменных кладок памятников архитектуры [5].

В работе [6] исследовались прочность и деформации кирпичной кладки, усиливаемой инъекцией раствора фурановой смолы. При прочности кладочного раствора 1–2,5 МПа в зависимости от способа приложения нагрузки увеличение прочности усиленной кладки по сравнению с неусиленной составило 63%. В то же время при прочности раствора 7,5–11 МПа эффект от усиления оказался ниже и составил 37,5%. Это относилось к усилению образцов кладки как с трещинами, так и без них. В выводах автор рекомендует принять коэффициент условий работы для всех случаев нагружения и при разных прочностях кладочного раствора 1,2.

В работе Л. В. Дубровской приведены результаты усиления кладки памятников Казахстана, выполненной из необожженного кирпича на лессовом растворе инъекцией гипсового раствора [7].

В 2006 г. авторами данной работы опубликована статья [8], подводившая итог проведенным работам по усилению кирпичной кладки инъекцией полимерцементного раствора с добавками извести. Было показано, что «...несущая способность кладки с силовыми трещинами после ее усиления инъекцией может увеличиться по сравнению с первоначальной до 30%, чего нельзя сказать о кладке без трещин... Инъекция кладки имеет смысл только при наличии там трещин, пустот, незаполненных швов и т. п. В противном случае эффект при очень частом устройстве отверстий для подачи раствора будет в лучшем случае нулевым. В худшем случае кладку можно ослабить. И уж совсем неправильным будет после проведения такого «усиления» увеличивать расчетное сопротивление кладки...».

В 2008 г. авторами были проведены испытания кладки из керамического кирпича, сложенной на цементно-песчаном и известковом растворах [9], усиленной инъекцией эпоксидной смолой производства итальянской фирмы Globalchimica S.R.L. Эффект от усиления был получен при испытании образцов с множественными силовыми трещинами, полученными после испытания в прессе неусиленных образцов. Было установлено, что инъекционный раствор в образцах без трещин при растворах с низкой прочностью (до 0,2 МПа) распространялся в основном на незначительные расстояния по контакту между кирпичом и кладочным раствором. В образцах с трещинами инъекционный раствор

распространялся практически по всей кладке. Авторы делают выводы, что эффективность усиления кладки методом инъекции зависит во многом от качества кладки, наличия или отсутствия неплотностей в растворных швах, пустот и трещин, а также прочности кладочного раствора.

В СТО 36554501-010-2008 [10], разработанном на основе проведенных исследований, для участков кладки с трещинами, расстояние между которыми не превышает 15–20 см, коэффициент увеличения прочности кладки, усиленной инъекцией эпоксидной смолы, рекомендуется принять равным 3,0 при прочности кладочного раствора не более 0,2 МПа и 1,5 при растворах большей прочности.

В докладе авторов настоящей статьи на конференции в Германии в 2012 г. сообщалось об эффективности разработанных составов для усиления исторической кладки инъекцией под давлением раствором на основе гидравлической извести с минеральными добавками на основе микродура [11].

В работе А. А. Шилина [12] приведены различные составы инъекционных растворов, в том числе для каменной кладки.

В работе (2017 г.) [13] подведен итог испытаний кладки из исторического и современного кирпича, усиленной различными составами.

В СП 427.1325800.2018 [14] были внесены основные положения по усилению кладки методом инъекции. Указано, что повышение несущей способности кладки при усилении инъекцией возможно только при наличии множественных силовых трещин (терминология авторов), характеризующихся тем, что расстояние между ними не должно превышать 15–20 см (рис. 1). В противном случае усиление следует считать конструктивным, направленным на обеспечение монолитности кладки. В развитие этого СП были разработаны «Методические указания по усилению каменной кладки, в том числе исторических зданий, инъекцией раствором» [15].

В работе [16] (2018 г.) приведены результаты испытаний кирпичной кладки, усиленной методом инъекции на центральное сжатие по методике ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. Для каждого вида раствора было изготовлено по два образца кладки. Установлено, что при инъекции раствором Макфлюо прочность кладки увеличивалась на 25–30% по сравнению с неусиленной кладкой, а при инъекции Микродур R-X/E – на 80%. В работе [17] (2023 г.) приводятся результаты испытаний тех же образцов, описанных в [16].

В работе [18] исследовалась возможность оценки прочности усиленной и неусиленной инъекцией кладки по прочности извлекаемых из стены на разных ее участках кернов. Приведенная в статье методика представляется спорной.

Проводимые за рубежом исследования по усилению кирпичной кладки методом инъекции и разрабатываемые на их основе рекомендации направлены, в первую очередь,

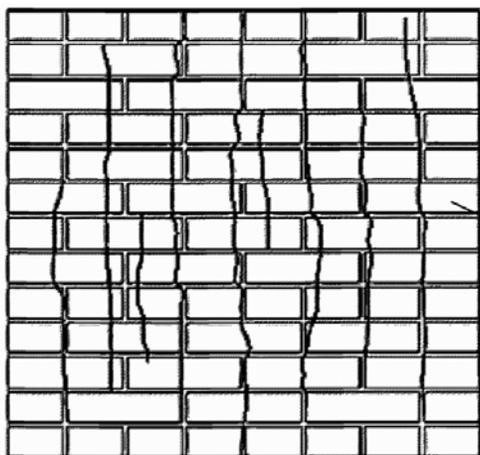


Рис. 1. Множественные силовые трещины [13, 14]  
Fig. 1. Multiple load cracks [13, 14]

на повышение монолитности кладки. При этом увеличение прочности кладки, усиленной методом инъекции, в этих документах не регламентируется.

В настоящей работе приводятся результаты проводившихся авторами исследований прочности кладки, усиленной инъекцией метилметакрилата, которые входят в комплексную программу, начатую еще в 2004 г. и продолжающуюся по настоящее время.

## **1. Экспериментальные исследования усиления кладки инъекцией метилметакрилата**

### *1.1. Исследования усиления кладки инъекцией метилметакрилата без трещин*

#### *1.1.1. Материалы для кладки. Методика проведения испытаний кладки*

Все образцы изготавливались из полнотелого керамического кирпича. Образцы № 25 и 26 были изготовлены из кирпича марки 75 на растворе прочностью на сжатие 0,8 МПа. Образец № 8 изготовлен из кирпича марки 175. Образец № 9 изготовлен из исторического кирпича прочностью 7,5 МПа на известковом растворе прочностью 0,8 МПа.

Образцы испытывались в гидравлическом прессе, деформации кладки измерялись индикаторами с ценой деления 0,01 мм.

Верхняя плита пресса была оборудована шаровым шарниром, нижняя закинена. Нагрузка подавалась этапами, равными примерно 0,1 от разрушающей нагрузки. После подачи нагрузки на каждом из этапов производилась выдержка длительностью по 3 минуты.

#### *1.1.2. Методика усиления образцов кладки без трещин*

В образцах без трещин отверстия бурились под углом к горизонту таким образом, чтобы пересекались и вертикальные, и горизонтальные растворные швы. Раствор метилметакрилата подавался под давлением.

#### *1.1.3. Характер разрушения опытных образцов, усиленных без трещин*

Разрушение образцов происходило в результате образования вертикальных трещин, разделяющих ее на отдельные столбики. Фотографии образцов после их испытаний приведены на фото в табл. 1.

#### *1.1.4. Упругие свойства кладки, усиленной без трещин*

На рис. 2 и 3 приведены графики зависимости относительных вертикальных деформаций кладки для образцов из кирпича марки М175 и М75 от относительного уровня обжаривания. Из них видно, что нелинейные составляющие вертикальных деформаций относительно невелики. Графики горизонтальных деформаций имеют более ярко выраженную нелинейную зависимость.

#### *1.1.5. Распространение метилметакрилата в кладке без трещин*

Исследовалось распространение метилметакрилата по кладке. Следует отметить, что при закачке метилметакрилата достичь требуемого давления 20 атм., как это практикуется при инъекции в бетон, не удавалось, т. к. раствор выходил на поверхность по неплотным растворным швам.

Таблица 1

**Образцы, усиленные инъекцией в кладку без трещин**

Table 1

**Specimens reinforced by grouting into a masonry structure without cracks**

№	Марка	Эскиз после испытания	$K_{усилен} = N_{усил} / N_{эт}$	Расход раствора
1	№ 25		1,17	8,5 л
2	№ 26		1,17	10,5 л
3	№ 8		1,0	20 л

Таблица 1. Продолжение  
Table 1. Continuation

№	Марка	Эскиз после испытания	$K_{усилен} = N_{усил} / N_{эт}$	Расход раствора
4	№ 19		1,0	

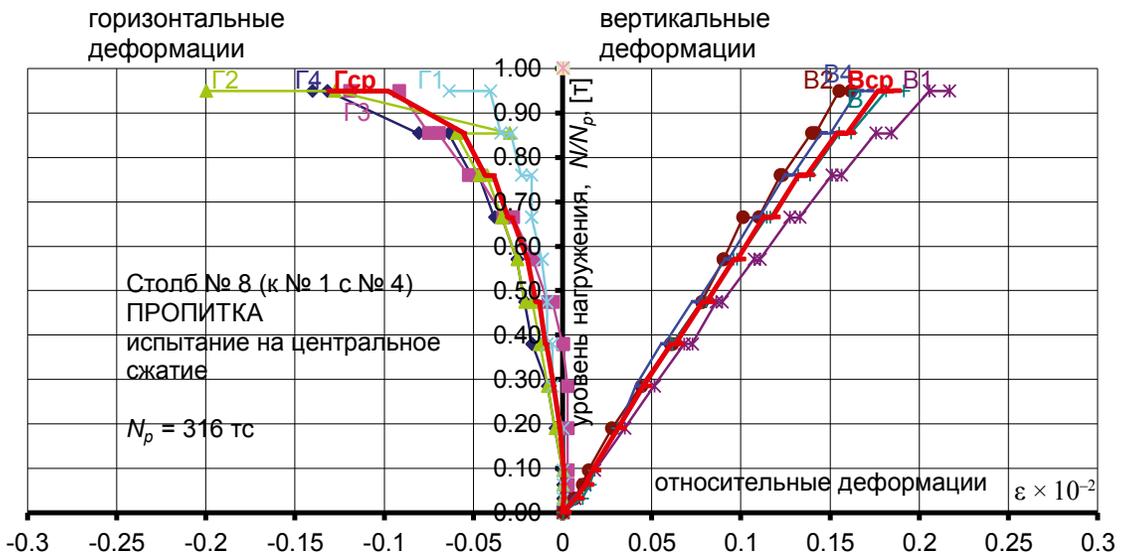


Рис. 2. Деформации образца № 8 из кирпича марки М175  
Fig. 2. Deformations of specimen No. 8 made of M175 brick

Проведенные тестовые испытания на малых образцах (растворных кубах и отдельных кирпичах) показали, что при отсутствии давления метилметакрилат распространяется по этим материалам на незначительное расстояние от отверстий, не превышающее нескольких сантиметров (рис. 4).

Из рис. 5 и 6 видно, что в образцах-столбах без трещин метилметакрилат также распространялся на относительно небольших участках, расположенных вблизи отверстий, через которые производилась его подача.

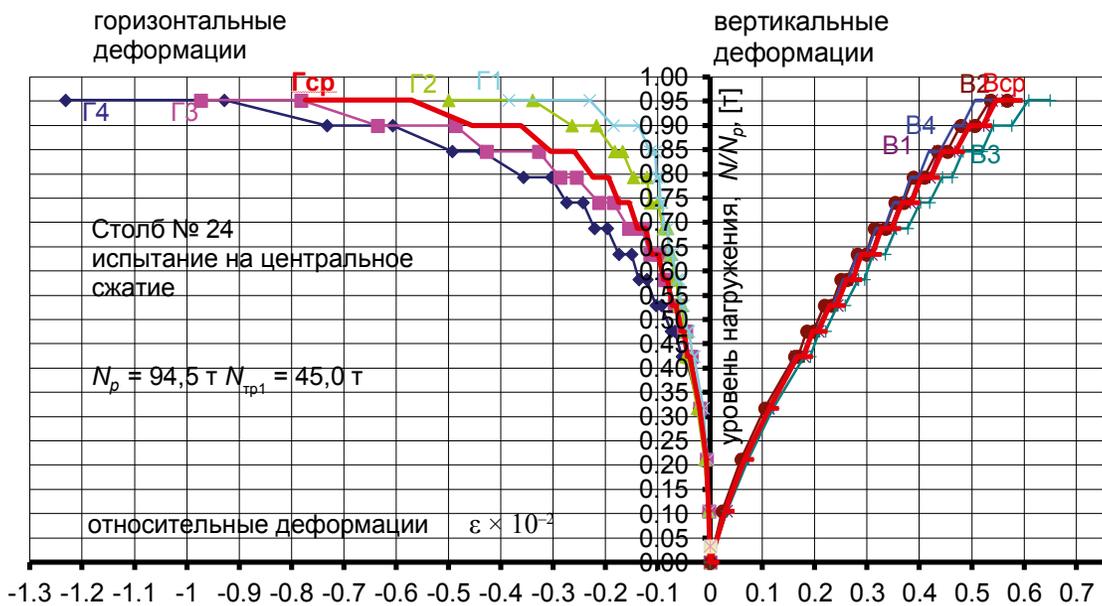


Рис. 3. Деформации образца № 24 из кирпича марки М75  
 Fig. 3. Deformations of specimen No. 24 made of M75 brick

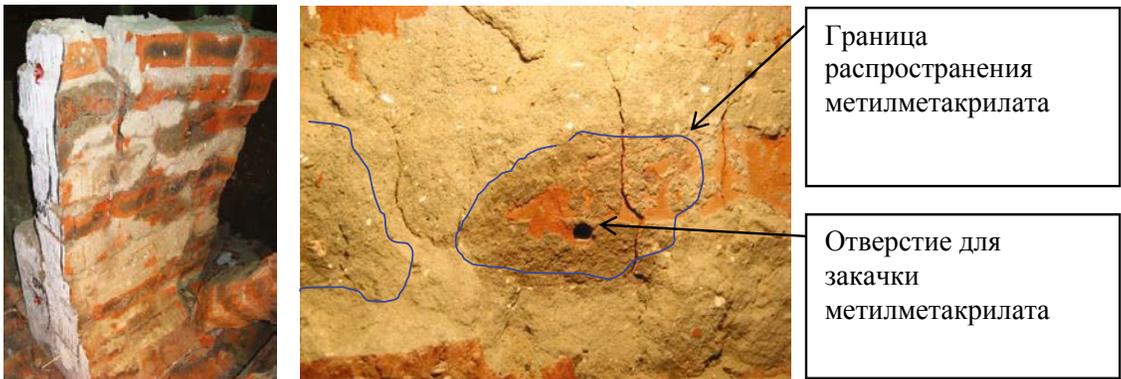


Рис. 4. Пробная инъекция метилметакрилата без давления в растворные кубики  
 Fig. 4. Test injection of methyl methacrylate without pressure into mortar cubes



**Рис. 5.** Вскрытие кладки из исторического кирпича с целью определения границ зоны пропитки метилметакрилатом

**Fig. 5.** Opening of a historic brick masonry to determine the boundaries of the methyl methacrylate impregnation area



**Рис. 6.** Вскрытие кладки из современного кирпича с целью определения границ зоны пропитки метилметакрилатом

**Fig. 6.** Opening of a modern brick masonry to determine the boundaries of the methyl methacrylate impregnation area

## 1.2. Исследование усиления кладки с трещинами инъекцией метилметакрилата

### 1.2.1. Материалы и методика проведения испытаний кладки

Для исследований был применен тот же полнотелый керамический кирпич и кладочный раствор, что и в образцах № 25 и 26 в первой серии испытаний усиленных без трещин образцов. Методика испытаний идентична приведенной в разделе 1.1. После испытаний в прессе образцы, получившие трещины, усиливались методом инъекции.

### 1.2.2. Результаты испытаний

Фотографии образцов после первого и второго этапов испытаний приведены в табл. 2. После первого этапа испытаний трещины в кладке появились достаточно равномерно, как и в образцах-близнецах из первой серии испытаний № 25 и 26. Предельная нагрузка у всех образцов оказалась практически одинаковой (94 тс).

После второго этапа испытаний предельные нагрузки существенно различались (в 1,5 раза), превышая предельные усилия в неусиленных образцах в 1,38–2,1 раза.

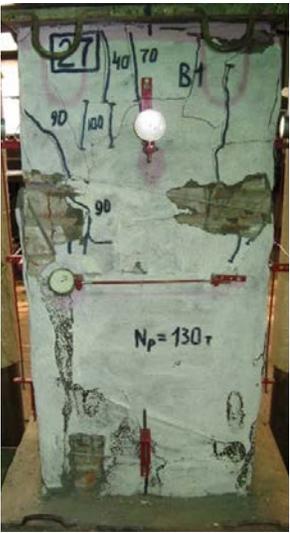
Основные трещины и сколы наблюдались в верхней части образцов.

Таблица 2

**Образцы, усиленные инъекцией в кладку с трещинами**

Table 2

**Specimens reinforced by injection into a cracked masonry**

№	Марка	Эскиз до испытания	Эскиз после испытания	$K_{усил} = \frac{N_{усил}}{N_{эт}}$	Расход раствора
1	№ 23-27			1,38	30 л
2	№ 24-28			2,1	37 л (пропитался в основном только низ, там кладка более прочная)



Граница  
распространения  
метилметакрилата  
в нижней части  
образца

**Рис. 7.** Проникание метилметакрилата в кладку с трещинами, образовавшимися после первого этапа испытаний.  
Пропиталась кладка в основном только в нижней части образца  
**Fig. 7.** Penetration of methyl methacrylate into a masonry structure with cracks formed after the first stage of testing.  
The masonry was mainly impregnated only in the lower part of the specimen

### *1.2.3. Распространение метилметакрилата в кладке с трещинами*

Благодаря трещинам распространение метилметакрилата по телу кладки было существенно выше, чем в образцах без трещин. Косвенно об этом говорит тот факт, что расход метилметакрилата во втором случае был в среднем в 3,7 раза выше. Вместе с тем вследствие большой текучести метилметакрилата происходило его стекание в низ образца, что привело к тому, что прочность нижней части кладки оказалась выше, чем верхней. Выполненные вскрытия кладки после испытаний образцов подтвердили неравномерность распространения метилметакрилата (рис. 7).

## **Выводы**

1. Технология усиления кладки инъекцией метилметакрилата существенно отличается от технологии усиления бетона, где возможно обеспечить высокое давление и благодаря этому – хорошее распространение по телу бетона.
2. Инъекция метилметакрилата в кладку, не имеющую трещин, не гарантирует повышения ее несущей способности и потому не рекомендуется.
3. Инъекция метилметакрилата в кладку с множественными силовыми трещинами позволяет повысить ее несущую способность.
4. Вследствие большой текучести метилметакрилата инъекцию следует проводить ярусами по высоте не более 50 см, начиная следующий ярус уже после полимеризации на нижнем ярусе.
5. Учитывая большой разброс прочности, рекомендуется коэффициент увеличения прочности кладки, усиленной с трещинами, по отношению к прочности аналогичной неусиленной кладки, не имеющей трещин, принимать по нижней границе равным 1,2 при прочности кладочного раствора 5 МПа и выше.

## Список литературы

1. Рекомендации по повышению качества каменной кладки и стыков крупнопанельных зданий инъекцированием под давлением. Москва: Стройиздат; 1987.
2. Рекомендации по усилению каменных конструкций зданий и сооружений. Москва: Стройиздат; 1984.
3. *Воронина В.П.* Прочность и деформативность кирпичной кладки и стыков крупнопанельных зданий, инъекцированных цементными растворами [диссертация]. Москва; 1986.
4. СНиП II-22-81\*. Каменные и армокаменные конструкции. Москва: Госстрой России; 2004.
5. Технология инъекционного укрепления каменных кладок памятников архитектуры. Методические рекомендации. Москва: Ин-т «Спецпроектреставрация»; 1991.
6. *Ханов Н.М.* Прочность и деформативность кирпичной кладки при местном сжатии с учетом ее инъекцирования модифицированными полимерными композициями [диссертация]. Москва; 1993.
7. *Дубровская Л.В.* Прочность и деформативность кирпичной кладки памятников архитектуры Казахстана и разработка методов ее усиления [диссертация]. Москва; 2004.
8. *Ищук М.К., Фролова И.Г., Ищук Е.М.* Усиление каменных конструкций. Промышленное и гражданское строительство. 2006;(8):28–30.
9. *Ищук М.К., Ищук Е.М., Фролова И.Г.* Усиление кладки методом инъекции эпоксидной смолы. Промышленное и гражданское строительство. 2013;(4):48–51.
10. СТО 36554501-010-2008. Усиление кирпичной кладки методом инъекции эпоксидной смолы «GLOBALPOX I-10/138/ВТ». Москва: ФГУП «НИЦ «Строительство»; 2008.
11. *Pantschenko A., Ishchuk M., Ishchuk E.* Modifizierten Feinstzemente für die Mauerwerksanierung. In: Ibausil, Weimar, 12–15 september 2012. 18 Internationale Baustofftagung. Vol. 2. Weimar: Bauhaus – Universität Weimar; 2012, p. 172.
12. *Шилин А.А.* Ремонт строительных конструкций с помощью инъекцирования. Москва: Горная книга: Изд-во МГГУ; 2009.
13. *Ищук М.К.* Исследование прочности и деформаций кирпичных стен и сводов, усиленных с применением отечественных технологий и материалов, совместимых с исторической кладкой. Отчет о НИР/НИОКР № АААА-Б19-219052790078-0. Москва; 2019.
14. СП 427.1325800.2018. Каменные и армокаменные конструкции. Методы усиления. Москва: Стандартиформ; 2019.
15. Методические указания по усилению каменной кладки, в том числе исторических зданий, инъекцией раствором [интернет]. Москва; 2019. Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720336.pdf>.
16. *Забелина О.Б., Кунин Ю.С.* Выбор способа усиления кирпичных вертикальных конструкций после детального технического обследования объекта федерального государственного бюджетного учреждения культуры Политехнический музей. Наука и бизнес. 2018;(11):102–107.
17. *Грановский А.В., Кунин Ю.С., Легецкий О.Е.* Оценка прочности кирпичной кладки, усиленной инъекционным составом. Промышленное и гражданское строительство. 2023;(2):37–43. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.02.37-43>
18. *Грановский А.В., Кунин Ю.С., Легецкий О.Е.* Инъекционные составы для повышения прочности и монолитности кирпичной кладки. Промышленное и гражданское строительство. 2023;(4):16–20. <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.04.16-20>

## References

1. Recommendations for improving the quality of masonry and joints of large-panel buildings by injection under pressure. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1987. (In Russian).
2. Recommendations for strengthening stone structures of buildings and structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1984. (In Russian).
3. *Voronina V.P.* Strength and deformability of brickwork and joints of large-panel buildings injected with cement mortars [dissertation]. Moscow; 1986. (In Russian).
4. SNiP II-22-81\*. Stone and reinforced stone structures. Moscow: Gosstroy of Russia; 2004. (In Russian).
5. Technology of injection reinforcement of masonry of architectural monuments. Methodological recommendations. Moscow: Spetsproektrestavratsiya; 1991. (In Russian).
6. *Khanov N.M.* Strength and deformability of brickwork under local compression, taking into account its injection with modified polymer compositions [dissertation]. Moscow; 1993. (In Russian).

7. *Dubrovskaya L.V.* Strength and deformability of brickwork of architectural monuments of Kazakhstan and the development of methods for its reinforcement [dissertation]. Moscow; 2004. (In Russian).
8. *Ishchuk M.K., Frolova I.G., Ishjuk E.M.* Reinforcing the brick structures. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2006;(8):28–30. (In Russian).
9. *Ishchuk M.K., Ishchuk E.M., Frolova I.G.* Strengthening of masonry with injection of epoxy resin. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2013;(4):48–51. (In Russian).
10. STO 36554501-010-2008. Strukturwl restoration of brik masoury by injection with epoxy «GLOBALPOX 1-10/138/BT». Moscow: FSUE Research Center of Construction; 2008. (In Russian).
11. *Pantschenko A., Ishchuk M., Ishchuk E.* Modifizierten Feinstzemente für die Mauerwerksanierung. In: Ibausil, Weimar, 12–15 september 2012. 18 Internationale Baustofftagung. Vol. 2. Weimar: Bauhaus – Universitat Weimar; 2012, p. 172.
12. *Shilin A.A.* Repair of building structures by injection. Moscow: Gornaya kniga: Publishing House of Moscow State University; 2009. (In Russian).
13. *Ishchuk M.K.* A study of the strength and deformations of brick walls and vaults reinforced with the use of domestic technologies and materials compatible with historical masonry. Research and Development Report No. AAAA-B19-219052790078-0. Moscow; 2019. (In Russian).
14. SP 427.1325800.2018. Masonry and reinforced masonry structures. Methods of strengthening. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
15. Methodological guidelines for strengthening masonry, including historical buildings, by injection of mortar [internet]. Moscow; 2019. Available at: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293720/4293720336.pdf>. (In Russian).
16. *Zabelina O.B., Kunin Yu.S.* The choice of a method for strengthening brick vertical structures after a detailed technical inspection of the object of the federal state budgetary institution of culture Polytechnic Museum. Science and Business. 2018;(11):102–107. (In Russian).
17. *Granovskiy A.V., Kunin Yu.S., Legetskiy O.E.* Evaluation of the strength of brickwork reinforced with an injection compound. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2023;(2):37–43. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.02.37-43>
18. *Granovskiy A.V., Kunin Yu.S., Legetskiy O.E.* Injection formulations to increase the strength and solidity of brickwork. *Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering*. 2023;(4):16–20. (In Russian). <https://doi.org/10.33622/0869-7019.2023.04.16-20>

## Информация об авторах / Information about the authors

**Евгений Михайлович Ищук**, заведующий группой лаборатории реконструкции уникальных каменных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: [ruskon@inbox.ru](mailto:ruskon@inbox.ru)  
тел.: +7 (926) 329-29-69

**Evgeniy M. Ishchuk**, Group Leader of the Laboratory for the Reconstruction of Unique Stone Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: [ruskon@inbox.ru](mailto:ruskon@inbox.ru)  
tel.: +7 (926) 329-29-69

**Михаил Карпович Ищук**✉, д-р техн. наук, заведующий лабораторией реконструкции уникальных каменных зданий и сооружений, ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: [kamkon@yandex.ru](mailto:kamkon@yandex.ru)  
тел.: +7 (926) 535-20-32; +7 (499) 174-79-96 (83)

**Mikhail K. Ishchuk**✉, Dr. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for the Reconstruction of Unique Stone Buildings and Structures, Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: [kamkon@yandex.ru](mailto:kamkon@yandex.ru)  
tel.: +7 (926) 535-20-32; +7 (499) 174-79-96 (83)

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.421: 620.1

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-124-138](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-124-138)

EDN: ONGAWI

# НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ КЛАДКИ С ПРИМЕНЕНИЕМ КРУПНОФОРМАТНЫХ КЕРАМИЧЕСКИХ КАМНЕЙ ПРИ ДЕЙСТВИИ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ НАГРУЗОК

О.И. ПОНОМАРЕВ<sup>1</sup>, канд. техн. наук

М.А. МУХИН<sup>1</sup>

О.С. ЧИГРИНА<sup>1</sup>

А.Ю. ДОЗОРОВА<sup>1,✉</sup>

А.В. ЛОГВИНОВ<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> ООО «ТД БРАЕР», ул. Нагорная, д. 18, к. 4, г. Москва, 117186, Российская Федерация

## Аннотация

*Введение.* В СП 15.13330.2020 приведены специальные требования по расчету кладки стен зданий с применением крупноформатных керамических камней пустотностью до 57%, в том числе при действии сосредоточенных нагрузок (смятии). В частности, в таблице 7.5 указанного СП даны коэффициенты для определения расчетных значений кладки при смятии. Однако результаты отечественных и зарубежных исследований показывают, что при кладке из камня высокой пустотностью, более 50%, необходимо уточнение значений коэффициента для определения расчетных сопротивлений кладки смятию. В работе приведены результаты экспериментальных исследований, проведенных в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко, по определению прочности кладки при смятии для уточнения расчетных коэффициентов, представленных в таблице СП 15.13330.2020.

*Цель.* На основании результатов отечественных и зарубежных экспериментальных исследований разработать методику и уточнить значения переходных коэффициентов для определения расчетных значений прочности кладки из крупноформатных керамических камней при смятии.

*Материалы и методы.* Проведены экспериментальные исследования по изучению напряженно-деформированного состояния крупноформатных керамических камней и кладки стен с их применением при действии сосредоточенных нагрузок, приложенных по схемам, которые наиболее точно могут быть реализованы в лабораторных условиях – схемы а и д, приведенные в п. 7.14 СП 15.13330.2020.

*Выводы.* Результаты проведенных исследований показали, что прочность кладки из крупноформатных керамических камней при смятии зависит от нескольких факторов, в т. ч. величины нормальных и касательных напряжений в вертикальных сечениях между сжатой зоной и незагруженным участком кладки. Кроме того, большое влияние оказывает эффект обоймы при наличии горизонтальных швов.

**Ключевые слова:** крупноформатный керамический камень, кладка, напряженное состояние, местное сжатие, смятие, сосредоточенные нагрузки, прочность, деформативность

**Для цитирования:** Пономарев О.И., Мухин М.А., Чигрина О.С., Дозорова А.Ю., Логвинов А.В. Напряженно-деформированное состояние кладки с применением крупноформатных керамических камней при действии

сосредоточенных нагрузок. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):124–138. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-124-138](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-124-138)

#### **Вклад авторов**

Пономарев О.И., Логвинов А.В. – введение, анализ результатов исследований, выводы.  
Мухин М.А., Чигрина О.С., Дозорова А.Ю. – проведение экспериментальных исследований, корректировка статьи.

#### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

#### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 26.06.2024

Поступила после рецензирования 08.07.2024

Принята к публикации 11.07.2024

## **STRESS-STRAIN STATE OF MASONRY WITH LARGE CERAMIC BLOCKS UNDER CONCENTRATED LOADS**

O.I. PONOMAREV<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

M.A. MUKHIN<sup>1</sup>

O.S. CHIGRINA<sup>1</sup>

A.Yu. DOZOROVA<sup>1</sup>,✉

A.V. LOGVINOV<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup> LLC "Trade House BRAER", Nagornaya str., 18, bld. 4, Moscow, 117186, Russian Federation

### **Abstract**

*Introduction.* Special requirements for the calculation of masonry walls using large ceramic blocks with the void content up to 57 %, including under the action of concentrated loads (buckling) are given in SP 15.13330.2020. In particular, Table 7.5 of this SP gives the coefficients for determining the calculated values of masonry under buckling. However, the results of Russian and foreign studies show that the masonry made of blocks with the void content more than 50 % requires clarification of the coefficient values for determining the calculated resistance of masonry buckling. The results of experimental studies conducted at Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko to determine the masonry strength under buckling for clarifying the calculated coefficients presented in SP 15.13330.2020 are given.

*Aim.* To develop a methodology and specify the transition coefficients for determining the calculated values of the strength of large ceramic block masonry under buckling on the basis of the results of Russian and foreign experimental studies.

*Materials and methods.* Experimental studies have been carried out to examine the stress-strain state of large ceramic blocks and masonry walls with their use under the action of concentrated loads applied according to the schemes that can be most accurately realized in laboratory conditions, particularly schemes a and e given in paragraph 7.14 of SP 15.13330.2020.

*Conclusions.* The results of these studies have shown that the buckling strength of large ceramic blocks masonry depends on several factors, including the magnitude of normal and tangential stresses in vertical

sections between the compressed zone and the unloaded section of the masonry. In addition, the shell effect in the presence of horizontal joints has a great influence.

**Keywords:** large ceramic block, masonry, stress state, local compression, buckling, concentrated loads, strength, deformability

**For citation:** Ponomarev O.I., Mukhin M.A., Chigrina O.S., Dorozova A.Yu., Logvinov A.V. Stress-strain state of masonry with large ceramic blocks under concentrated loads. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):124–138. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-124-138](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-124-138)

#### **Authors contribution statement**

Ponomarev O.I., Logvinov A.V. – introduction, analysis of research results, conclusions.

Mukhin M.A., Chigrina O.S., Dorozova A.Yu. – conducting experimental studies, manuscript adjustment.

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 26.06.2024*

*Revised 08.07.2024*

*Accepted 11.07.2024*

## **Введение**

За последние 20–25 лет в практике строительства в Российской Федерации широкое применение находят крупноформатные керамические камни пустотностью до 57% при высоте ряда кладки более 200 мм. Эффективность их применения обуславливается снижением трудозатрат при возведении кладки стен зданий и высокими теплотехническими характеристиками.

В связи с этим в действующие нормы по проектированию конструкций, возводимых с применением кладки из кирпича, камня, блоков, СП 15.13330.2020 «Каменные и армокаменные конструкции» [1] включены специальные требования по расчету и проектированию кладки стен зданий с применением крупноформатных керамических камней с высокой пустотностью – до 57%.

В табл. 6.2 [1] приведены расчетные сопротивления сжатию кладки из крупноформатных керамических камней пустотностью до 57%. В табл. 7.5 [1] даны коэффициенты для определения расчетного сопротивления кладки при действии местных нагрузок в зависимости от материала кладки и места приложения нагрузок.

Коэффициенты, приведенные в табл. 7.5, для некоторых случаев опирания сосредоточенной нагрузки на кладку на 10–20% повышают ее прочность за счет «эффекта обоймы». Поэтому, учитывая высокую пустотность крупноформатных керамических камней, в целях повышения надежности возводимых зданий и сооружений проведены теоретические и экспериментальные исследования по изучению напряженно-деформированного состояния крупноформатных керамических камней и кладки стен с их применением при действии сосредоточенных нагрузок.

## Экспериментальные исследования и методика испытаний прочности крупноформатных керамических камней при действии сосредоточенной нагрузки

Задача проведенных исследований состояла в получении экспериментальных данных прочности и деформативности кладки из высокопустотных крупноформатных (КФ) керамических камней (14,3NF и 12,4NF) при действии сосредоточенной нагрузки – местном сжатии (смятии).

Учитывая сравнительно большие размеры камня, позволяющие выполнять опирание конструкций на один камень, при проведении данных исследований сделано сравнение прочности при действии сосредоточенной нагрузки на камень с прочностью в кладке.

Для проведения экспериментальных исследований были отобраны КФ пустотелые керамические камни размеров  $510 \times 250 \times 219$  мм и  $440 \times 250 \times 219$  мм с вертикальными пустотами шириной 6–8 мм. Вид камней приведен на рис. 1.

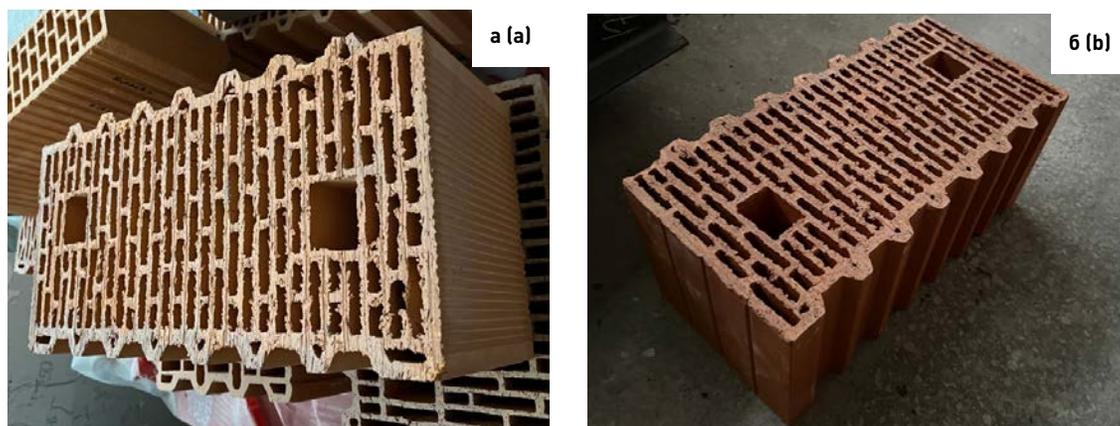
### Исследование прочности крупноформатных керамических камней при действии сосредоточенных нагрузок

При выполнении данной работы проведены исследования прочности КФ керамических камней при действии сосредоточенных нагрузок.

КФ камни имеют достаточно большую площадь ложковой поверхности, на которую может опираться и балка, и колонна. Поэтому может возникнуть вопрос об испытании на смятие не кладки, а только камня.

В целях сравнения результатов мы провели испытания на смятие не только кладки, но и камня. Для получения более достоверных результатов испытания проведены по наиболее простым схемам – схемы *a* и *d*, приведенным на рис. 2.

Выравнивание опорных поверхностей проведено цементно-песчаным раствором М300.



**Рис. 1.** Образцы КФ керамического камня размерами  $510 \times 250 \times 219$  мм и  $440 \times 250 \times 219$  мм с вертикальными пустотами производства ООО «Винербергер Кирпич» *(a)* и ООО «Кирпичный Завод Браер» *(b)*  
**Fig. 1.** Samples of large ceramic blocks with dimensions  $510 \times 250 \times 219$  mm and  $440 \times 250 \times 219$  mm with vertical voids produced by Wienerberger Brick LLC *(a)* and Brick Factory Braer LLC *(b)*

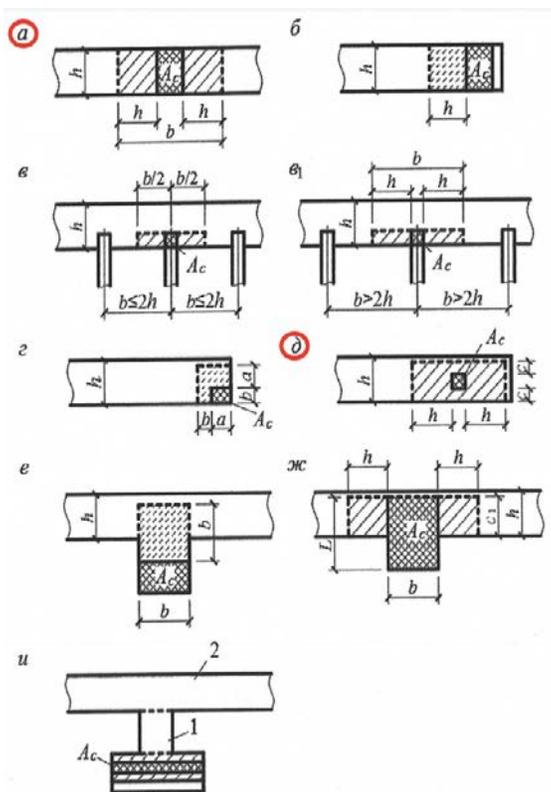


Рис. 2. Различные случаи местного сжатия [1, рис. 7.6]  
 Fig. 2. Different cases of local compression [1, Fig. 7.6]

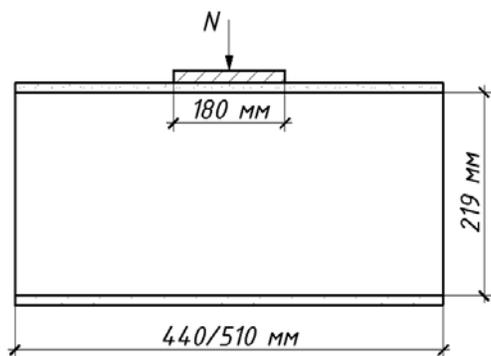


Рис. 3. Схема испытаний керамического КФ камня пустотностью 48–57% с щелевидными пустотами  
 Fig. 3. Testing scheme for large ceramic blocks with 48–57% void content with slit-shaped hollows

В средней части сечения камня прикладывалась сосредоточенная нагрузка, которая передавалась через плиту размером  $18 \times 24,5$  см.

Геометрические размеры КФ керамических камней 14,3NF и 12,4NF –  $510 \times 250 \times 219$  мм (рис. 3) и  $440 \times 250 \times 219$  мм.

Результаты испытания керамического КФ камня М100 размерами  $510 \times 250 \times 219$  мм и пустотностью 48–57% на местное сжатие (смятие) представлены в табл. 1. Характер разрушения данного керамического камня представлен на рис. 4.

### Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния кладки из КФ керамических камней при действии сосредоточенных (местных) нагрузок

Основной целью проведенных исследований является получение достоверных экспериментальных данных о прочности и деформативности кладки из КФ керамических камней пустотностью 48–57% при действии сосредоточенных нагрузок (местном сжатии или смятии).

В действующих нормах по проектированию каменных и армокаменных конструкций указаны 9 случаев приложения нагрузок, представленных на рис. 2 [1, рис. 7.6].

При проведении данных исследований были рассмотрены два наиболее просто реализуемых случая передачи сосредоточенных нагрузок на стены, включающих опирание сосредоточенной нагрузки на часть длины и ширины сечения (например, опирание колонны на стену толщиной 50–70 мм) – схема  $\delta$ , а также опирание конструкций на кладку по схеме  $a$ .

Испытания на сосредоточенную нагрузку проведены на образцах кладки двух видов – Серия № 1 при приложении нагрузки

Таблица 1

Результаты испытания керамического КФ камня М100 (510 × 250 × 219 мм) пустотностью 48–57% с щелевидными пустотами на местное сжатие (смятие) (рис. 2а)

Table 1

Test results of ceramic large ceramic blocks M100 (510 × 250 × 219 mm) with 48–57% void content with slit-shaped hollows on local compression (buckling) (Fig. 2a)

Метка	Площадь смятия, $A_{см}, \text{см}^2$	Нагрузка, $N_p, \text{тс}$	Предел прочности камня при смятии (схема а), $R_{см}^3, \text{кгс/см}^2$	Прочность камня, $R_1, \text{кгс/см}^2$	$\xi^p = \sqrt[3]{\frac{A}{A_{см}}}$	$R_{см}^p = \xi^p \times R_1, \text{кгс/см}^2$	$\frac{R_{см}^3}{R_1} = \xi^3$
1	441	47,9	108,6	105,0	1,42	149	1,04
2		47,1	106,8				
3		49,7	112,7				
Среднее			109,4				

$A = 1275 \text{ см}^2; R_1 = 10,5 \text{ МПа}$

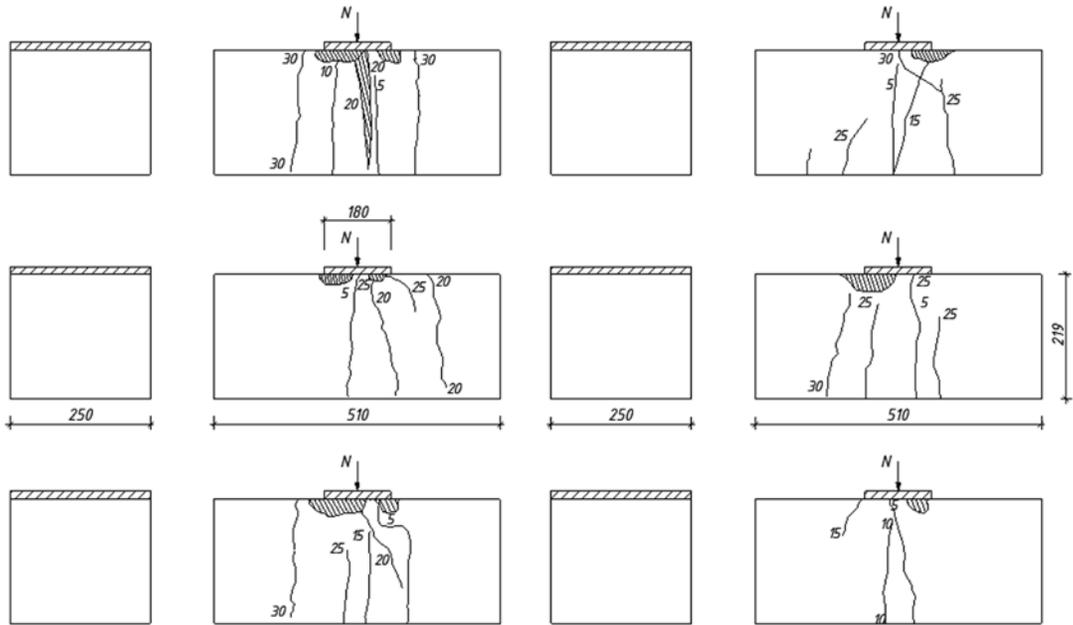


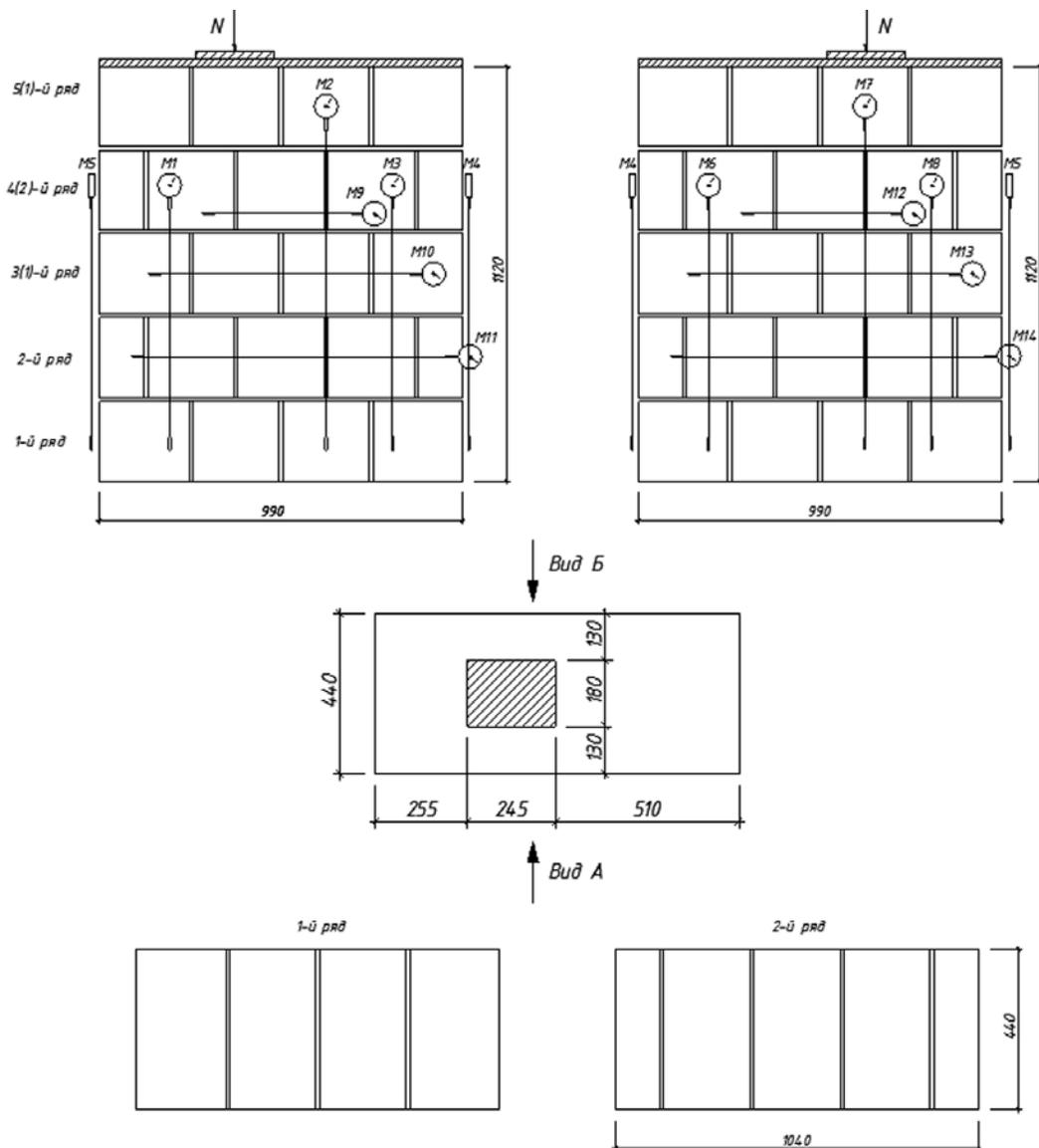
Рис. 4. Характер разрушения керамического камня пустотностью 48–57% (510 × 250 × 219 мм) с щелевидными пустотами при местном сжатии (смятии) (нагрузка в середине камня). При испытании кладки аналогичное приложение нагрузки соответствует схеме а (рис. 2)

Fig. 4. Character of fracture of a ceramic block with 48–57% void content (510 × 250 × 219 mm) with slit-shaped hollows under local compression (buckling) (load in the middle of the brick). When testing the masonry, a similar load application corresponds to scheme a of (Fig. 2)

по схеме *д*, Серия № 2 – при приложении нагрузки по схеме *а* – для сравнения прочности кладки с прочностью отдельного камня при сосредоточенной нагрузке.

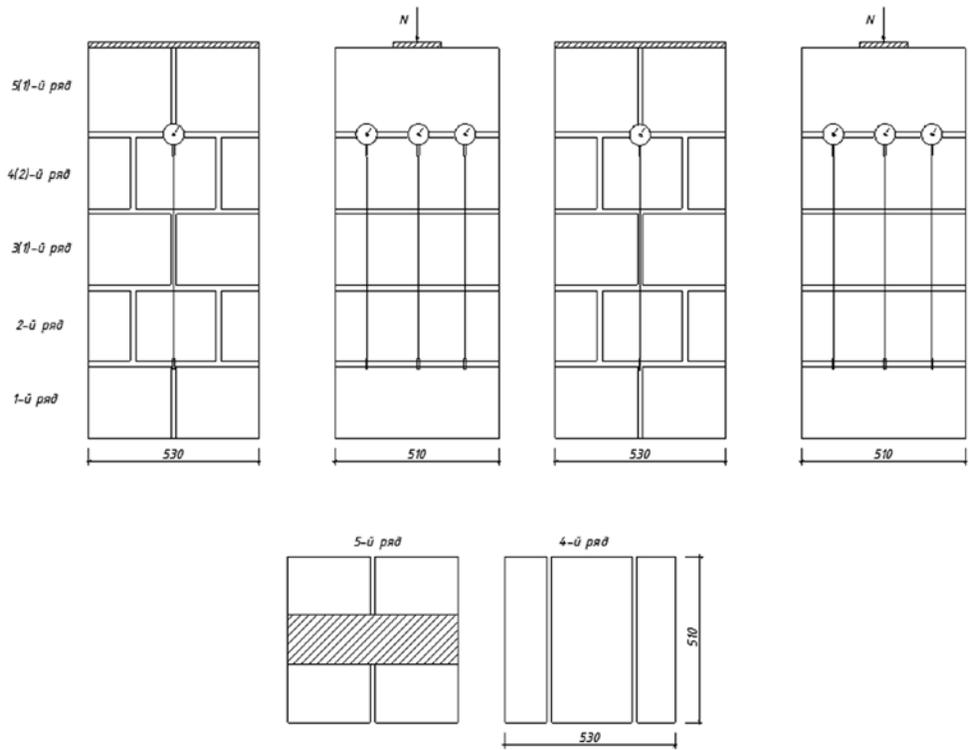
Вид перевязки и расположение приборов приведены на рис. 5–7.

Еще раз отметим, что при проведении данных исследований проведено сравнение напряженного состояния КФ керамического камня при его испытаниях отдельно в прессе без обжата и в кладке с обжатием по схеме *а*.



**Рис. 5.** Кладка на клеевом растворе. Система перевязки кладки образцов для испытания на местное смятие (при нагружении по схеме *д* рис. 2) и расположение приборов: вид перевязки на экспериментальном образце;

**Fig. 5.** Masonry on glue mortar. The masonry bond of samples for local buckling test (under loading according to the scheme *d* of Fig. 2 and arrangement of devices: type of masonry bond on the test sample; arrangement of blocks in rows



**Рис. 6.** Кладка на цементно-песчаном растворе. Система перевязки кладки образцов для испытания на местное смятие (при нагружении по схеме а рис. 2) и расположение приборов: вид перевязки на экспериментальном образце; раскладка камня в рядах

**Fig. 6.** Masonry on cement-sand mortar. The masonry bond of samples for local buckling test (under loading according to the scheme a of Fig. 2 and arrangement of devices: type of masonry bond on the test sample; arrangement of blocks in rows



**Рис. 7.** Общий вид образца Серии № 1 при испытании на местное смятие  
**Fig. 7.** General view of Series 1 sample in local buckling test

### Исследование напряженно-деформированного состояния кладки при действии сосредоточенной нагрузки по схеме а

Анализ деформированного состояния образцов при испытаниях показал, что в зоне под штампом и примыкающих к нему зонах преобладают сжимающие напряжения, а в остальной части образца – растягивающие. При этом максимальные значения деформаций сжатия наблюдаются в верхней части образца, непосредственно под штампом.

Результаты экспериментальных данных приведены в табл. 1, 2, 5 (по камню), а также на рис. 8 и в табл. 3–8 (по кладке).

Таблица 2

**Результаты испытания керамического крупноформатного камня М100, 12,7NF (440 × 250 × 219 мм) пустотностью 48–57% с щелевидными пустотами на местное сжатие (смятие) по схеме а (рис. 2)**

Table 2

**Test results of ceramic large ceramic blocks M100, 12,7NF (440 × 250 × 219 mm) with 48–57% void content with slit-shaped hollows on local compression (buckling) according to the scheme a (Fig. 2)**

Метка	Площадь смятия, $A_{см}$ , см <sup>2</sup>	Нагрузка, $N_p$ , тс	Предел прочности камня при смятии (схема а), $R_1$ , кгс/см <sup>2</sup>	Предел прочности камня при смятии (схема а), $R_{см}^p$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\xi^p = \sqrt[3]{\frac{A}{A_{см}}}$	$R_{см}^p = \xi^p \times R_1$	$\frac{R_{см}^p}{R_1} = \xi^3$
1	441	39,0	87	88,4	1,36	118	1,01
2		37,0		84,0			
3		41,0		93,1			
Среднее				88,1			

$A = 1100 \text{ см}^2$ ;  $R_1 = 8,7 \text{ МПа}$

Таблица 3

**Результаты испытаний опытных образцов кладки из крупноформатных керамических камней (14,3NF) на центральное сжатие, Серия № 2, цементно-песчаный раствор**

Table 3

**Test results of masonry test samples made of large ceramic blocks (14.3NF) in central compression, Series 2, cement-sand mortar**

Метка	Размеры образца, мм	Площадь, $A$ , см <sup>2</sup>	Прочность раствора, $R_2$ , кгс/см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка, тс		$\frac{N_{1тр}}{N_{раз}}$	Временное сопротивление кладки, кгс/см <sup>2</sup>		
				$N_{1тр}$	$N_{раз}$		$R_{1тр}$	$R_{раз}$	$R^u$
2-1	528 × 510 × 1220	2691	110	60	175	0,34	22,6	65,0	63,0
2-2	529 × 511 × 1210	2703	117	75	171	0,44	28,3	63,3	
2-3	528 × 511 × 1215	2698	114	75	167	0,45	28,3	61,9	
Среднее:		2697							

Таблица 4

**Результаты испытаний кладки из крупноформатного керамического пустотелого камня на местное сжатие (смятие) по схеме а (рис. 2)**

Table 4

**Results of local compression (buckling) tests of masonry with large ceramic hollow brick according to scheme a (Fig. 2)**

Группа	Метка	Прочность раствора, кгс/см <sup>2</sup>	Площадь, см <sup>2</sup>		$\xi p = \sqrt[3]{\frac{A}{A_{см}}}$	Разрушающее усилие, тс		$\frac{N_{1тр}}{N_{разр}}$	$R_{см}^3$ , кгс/см <sup>2</sup>	$R_{кл}^u$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\frac{R_{см}^3}{R^u}$
			сечения образца	штампа		$N_{1тр}$	$N_{разр}$				
2	10-2	100	2697	954	1,41	20,0	67	0,29	70,1	63,0	1,12
	11-2					22,1	65	0,34			
	12-2					22,5	69	0,38			

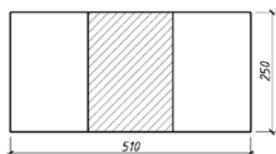
Таблица 5

**Результаты испытаний на сжатие и смятие крупноформатных керамических камней и кладки с их применением (на цементно-песчаном растворе)**

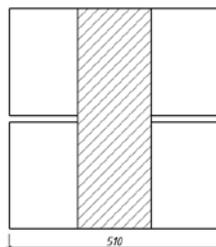
Table 5

**Results of compression and buckling tests of large ceramic blocks and masonry with their use (on cement-sand mortar)**

Марка камня	Прочность камня, МПа	Прочность камня при смятии, МПа	Прочность раствора, МПа	Прочность при сжатии, МПа	Прочность при смятии, МПа	$\xi^3$
М100	10,5	10,55	10,0	ср. предел прочности <u>камня</u> $R_1 = 10,5$	ср. предел прочности <u>камня</u> 10,55 (схема а)	$\frac{R_{см}^3}{R_{камень}^u} = 1,04$
			10,0	ср. предел прочности <u>кладки</u> $R_{кл}^u = 6,3$	$R_{см}^3 = 7,01$ (схема а)	$\frac{R_{см}^3}{R_{кл}^u} = 1,12$

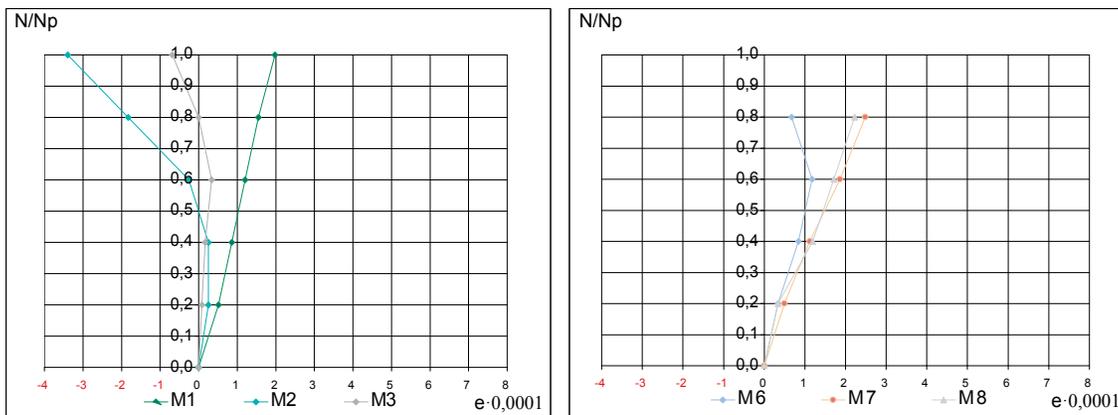


$$\frac{R_{см}^3}{R_{камень}^u} = 1,04$$



$$\frac{R_{см}^3}{R_{кл}^u} = 1,12$$

Примечание: рисунки к табл. 5



**Рис. 8.** Образец 1–1. Относительные продольные деформации кладки из керамического крупноформатного камня пустотностью до 57% при местном сжатии (смятии)

**Fig. 8.** Sample 1–1: Relative longitudinal deformations of masonry made of ceramic large blocks with hollows up to 57% under local compression (buckling)

Таблица 6

**Результаты испытаний опытных образцов кладки из крупноформатных керамических камней (12,4NF) на центральное сжатие, Серия № 1, клеевой состав (раствор)**

Table 6

**Test results of masonry samples made of large ceramic masonry blocks (12.4NF) in central compression, Series 1, glue composition (mortar)**

Метка	Размеры образца, мм	Площадь, $A$ , см <sup>2</sup>	Прочность раствора, $R_2$ , кгс/см <sup>2</sup>	Разрушающая нагрузка, тс		$\frac{N_{1тр}}{N_{разр}}$	Временное сопротивление кладки, кгс/см <sup>2</sup>		
				$N_{1тр}$	$N_{разр}$		$R_{1тр}$	$R_{разр}$	$R^u$
1–1	991 × 438 × 1115	4341	85	30	194	0,15	6,9	44,7	45,9
1–2	997 × 440 × 1117	4387	79	40	197	0,20	9,1	44,9	
1–3	1001 × 439 × 1119	4394	87	43	211	0,20	9,8	48,0	
Среднее:		4374							

Таблица 7

**Серия № 1. Результаты испытаний кладки из крупноформатного керамического пустотелого камня (М75) на местное сжатие (смятие) по схеме д рис. 2, клеевой состав (раствор)**

Table 7

**Series 1. Results of tests of masonry made of large-format ceramic hollow blocks (M75) on local compression (buckling) according to the scheme д Fig. 2, adhesive composition (mortar)**

Серия	Метка образца	Прочность раствора, кгс/см <sup>2</sup>	Площадь, см <sup>2</sup>		$\xi p = \sqrt[3]{\frac{A}{A_{CM}}}$	Разрушающая нагрузка, тс		$\frac{N_{1тр}}{N_{разр}}$	$R_{CM}^3$ , кгс/см <sup>2</sup>	Среднее	$R_{кл}^u$ , кгс/см <sup>2</sup>	$\frac{R_{CM}^3}{R^u}$
			сечения образца	штампа		$N_{1тр}$	$N_{разр}$					
1	1-1	87				10,0	25	0,4	56,7			
	2-1	81	4356	441	1,33	13,5	27	0,5	61,2	57,4	45,9	1,25
	3-1	79				11,5	24	0,48	54,4			

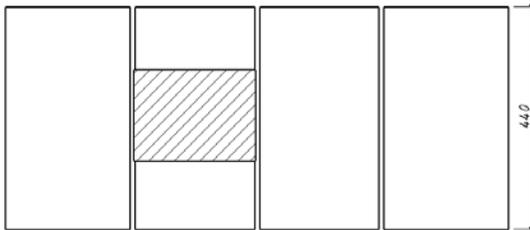
Таблица 8

**Результаты испытаний на сжатие и смятие крупноформатных керамических камней и кладки с их применением (на клеевом растворе)**

Table 8

**Results of compression and buckling tests of large ceramic blocks and masonry with their use (on glue mortar)**

Марка камня	Прочность камня, МПа	Прочность камня при смятии, МПа	Прочность раствора, МПа	Прочность при сжатии, $R_{кл}^u$ , МПа	Прочность при смятии, $R_{см}^3$ , МПа	$\frac{R_{см}^3}{R_{кл}^u}$
М75	8,7	8,81	8,37	ср. прочность кладки 4,5	5,74 (схема д)	1,25-1,27



$$\frac{R_{см}^3}{R_{кл}^u} = 1,25-1,27$$

Примечание: рисунок к табл. 8

## Заключение

В результате проведенных экспериментальных исследований были получены данные о прочностных и деформативных характеристиках кладки из крупноформатных керамических камней пустотностью 48–57% при действии сосредоточенных нагрузок.

1. Прочность кладки из крупноформатных керамических камней при местном сжатии зависит от нескольких факторов, включающих:

- величины нормальных и касательных напряжений в вертикальных сечениях между сжатой зоной и незагружаемыми участками кладки [2–4];

- деформативные характеристики кладки (в зависимости от вида раствора и кладочных изделий);

- эффект «обоймы» вокруг зоны смятия кладки.

В кладке из крупноформатных камней при большой высоте кладочного изделия (каменной) и их высокой пустотности величина нормальных и касательных напряжений в тонких внутренних перегородках (5–8 мм) будет значительно выше, чем в полнотелых изделиях, что повышает вероятность их разрушения.

Этот фактор оказывает существенное влияние на прочность кладки из изделий высокой пустотности при местном смятии.

2. Проведенные экспериментальные исследования показали, что на прочностные характеристики кладки из крупноформатных керамических камней пустотностью 48–57% при действии сосредоточенных нагрузок так же, как и в случае кладки из изделий с меньшей пустотностью, большое влияние оказывает эффект «обоймы» [5].

3. Предел прочности кладки из крупноформатных керамических камней на цементно-песчаном растворе (временное сопротивление) при смятии по схеме *a* превышает соответствующий предел прочности кладки при осевом сжатии на ~ 12% (обжатие нагруженного участка с двух сторон).

4. Предел прочности кладки из крупноформатных керамических камней на клеевом составе при смятии по схеме *d* превышает соответствующую прочность кладки при сжатии на ~ 25–27% (обжатие нагруженного участка с четырех сторон).

5. В табл. 6–8 приведены сводные результаты испытаний на сжатие и смятие кладки из крупноформатных керамических камней на клеевом составе (растворе). Наиболее высокая прочность при смятии достигнута в кладке с приложением нагрузки по схеме *d* (обжатие с четырех сторон).

6. Сравнение результатов испытаний на смятие крупноформатных керамических камней и кладки стен с их применением показали, что эффект «обоймы» (эффект Баушингера) оказывает влияние на прочность кладки при смятии даже при использовании в кладке камней высокой пустотности (до 57%) при незаполненных раствором вертикальных швах с пазогребневым соединением и наличием горизонтальных швов, которые усиливают эффект «обоймы». Расчетное значение коэффициента Баушингера,  $\xi$ , при приложении сосредоточенной нагрузки по схеме *d*, вычисленное по СП 15.13330.2020 [1], отличается от экспериментальных значений на 5–7% (табл. 7).

## Список литературы

1. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Москва: Минстрой России; 2020.
2. *Онищик Л.И.* Прочность и устойчивость каменных конструкций. Москва: ОНТИ, ЦНИПС; 1937.
3. *Худайнатов А.Э., Логвинов А.В., Иванова А.Ю., Павлова Е.А.* Особенности расчета конструкций из крупноформатных керамических камней на смятие по российским и европейским нормам. Строительная механика и расчет сооружений. 2022;(6):55–60.
4. *Семенов С.А.* Местное краевое и внецентренное сжатие бетона и кладки. В: Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций. Москва: Стройиздат; 1978, с. 98–106.
5. *Пильдиш М.Я.* Местные напряжения в каменной кладке. Москва; Ленинград: Стройиздат; 1945.
6. ГОСТ Р 58527-2019. Материалы стеновые. Методы определения пределов прочности при сжатии и изгибе. Москва: Стандартинформ; 2019.
7. EN 1996-1-1-2010. Eurocode 6: Design of masonry structures - Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures [internet]. Available at: <https://meganorms.ru/stb-din-en-1996-1-1-2010-12.html>.
8. ГОСТ 32047-2012. Кладка каменная. Метод испытания на сжатие. Москва: Стандартинформ; 2019.
9. *Bauschinger J.* Versuche mit Quatdern aus Natursteinen. Mitteilurgen aus dem Mechanischtechnhuischen Laboratorium der Kgl. Technischen Hochschule Munich. 1879;(6):13–14.

## References

1. SP 15.13330.2020. Masonry and reinforced masonry structures. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
2. *Onishchik L.I.* Strength and stability of stone structures. Moscow: ONTI, TSNIPS; 1937. (In Russian).
3. *Khudaynatov A.E., Logvinov A.V., Ivanova A.Y., Pavlova E.A.* Specifics of calcular masonry large-format organic block structures crushing (concentrated load) according to Russian and European standards. Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2022;(6):55–60. (In Russian). <https://doi.org/10.37538/0039-2383.2022.6.55.60>
4. *Sementsov S.A.* Local marginal and off-center compression of concrete and masonry. In: New in the design of concrete and reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1978, pp. 98–106. (In Russian).
5. *Pildish M.Ya.* Local stresses in masonry. Moscow; Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1945. (In Russian).
6. State Standard R 58527-2019. Wall materials. Methods for determination of ultimate compressive and bending strength. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
7. EN 1996-1-1-2010. Eurocode 6: Design of masonry structures – Part 1-1: General rules for reinforced and unreinforced masonry structures [internet]. Available at: <https://meganorms.ru/stb-din-en-1996-1-1-2010-12.html>
8. State Standard 32047-2012. Masonry. Method of compressive test. Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
9. *Bauschinger J.* Versuche mit Quatdern aus Natursteinen. Mitteilurgen aus dem Mechanischtechnhuischen Laboratorium der Kgl. Technischen Hochschule Munich. 1879;(6):13–14.

## Информация об авторах / Information about the authors

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

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

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

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

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

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

**Александра Юрьевна Дозорова**<sup>✉</sup>, инженер лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий (№ 7), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва  
e-mail: alexderges@yandex.ru  
тел.: +7 (499) 170-10-88

**Alexandra Yu. Dozorova**<sup>✉</sup>, Engineer of the Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings (No. 7), Research Institute of Building Constructions named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow  
e-mail: alexderges@yandex.ru  
tel.: +7 (499) 170-10-88

**Александр Викторович Логвинов**, технический директор, ООО «ТД БРАЕР», Москва  
e-mail: logvinov@braer.ru  
тел.: +7 (915) 368-36-60

**Alexander V. Logvinov**, Technical Director, LLC "Trade House BRAER", Moscow  
e-mail: logvinov@braer.ru  
tel.: +7 (915) 368-36-60

<sup>✉</sup> Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.012.082:692.2

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-139-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-139-147)

EDN: NKFBOS

# К ВОПРОСУ О КОЭФФИЦИЕНТЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ВЛАЖНОЙ КАМЕННОЙ КЛАДКИ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

В.А. ТИТАЕВ<sup>1,2,✉</sup>, канд. техн. наукИ.А. ЧЕРНЫЙ<sup>1,2</sup>Б.С. СОКОЛОВ<sup>1</sup>, канд. техн. наукД.В. ТИТАЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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

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

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Каширское шоссе, д. 31, г. Москва, 115409, Российская Федерация

## Аннотация

*Введение.* Каменная кладка является конструктивно неоднородным материалом (композитным), что обуславливает ортотропность ряда ее физико-механических характеристик, одна из которых – коэффициент термической деформации. Статья посвящена анализу коэффициента термической деформации каменной кладки в условиях ее работы в различных температурно-климатических условиях. В работе выполнен обзор исследований поведения кладки при перепадах температуры, в том числе при различной влажности.

*Цель.* Проанализировать поведение каменной кладки при замораживании. Сопоставляя результаты исследований увлажненных образцов каменной кладки, получить зависимость коэффициента термической деформации от ее влажности при отрицательных температурах.

*Материалы и методы.* Основой для исследования является материал М.А. Мурого, опубликованный в работе «Температурные деформации влажной кладки», и некоторые его ранее не опубликованные данные. При выполнении исследований применялся регрессионный анализ.

*Результаты.* Получены графические и математические зависимости коэффициента термической деформации каменной кладки в виде кусочно-линейных функций при отрицательных температурах, учитывающие влажность материала.

*Выводы.* Полученные в данной статье формулы коэффициентов температурной деформации наглядно показывают зависимость данного коэффициента от влажности при замораживании. Представленные зависимости в виде кусочно-линейных функций позволяют их использовать при расчетах напряженно-деформированного состояния каменных конструкций с применением современных программных комплексов. Широкий диапазон значений коэффициентов термической деформации кладки, представленный в литературных источниках, указывает на фрагментарность исследований, основывающихся на использовании керамических камней одного производителя. Ввиду важности этой характеристики для определения напряженно-деформированного состояния кладки следует выполнить масштабные исследования со систематизацией результатов при логически обоснованном максимальном количестве варьируемых параметров кладки, а по результатам исследований внести изменения в нормы проектирования и конструирования каменных конструкций.

**Ключевые слова:** коэффициент термической деформации, кладка при замерзании, влажность массовая

**Для цитирования:** Титаев В.А., Черный И.А., Соколов Б.С., Титаев Д.В. К вопросу о коэффициенте термической деформации влажной каменной кладки при отрицательных температурах. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):139–147. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-139-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-139-147)

**Вклад авторов**

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

**Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Благодарности**

Авторы выражают благодарность автору работы «Температурные деформации влажной кладки» Михаилу Алексеевичу Мурому за предоставленные материалы лабораторных исследований для написания данной статьи.

*Поступила в редакцию 22.05.2024*

*Поступила после рецензирования 17.06.2024*

*Принята к публикации 20.06.2024*

## ON THE COEFFICIENT OF LINEAR THERMAL EXPANSION OF WET MASONRY AT FREEZING TEMPERATURES

V.A. TITAEV<sup>1,2,✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

I.A. CHERNY<sup>1,2</sup>

B.S. SOKOLOV<sup>1</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

D.V. TITAEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *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*

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

<sup>3</sup> *National Research Nuclear University MEPHI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, 115409, Russian Federation*

### Abstract

*Introduction.* Stone masonry is a structurally heterogeneous (composite) material; therefore, a number of its physical and mechanical characteristics are orthotropic, including the coefficient of linear thermal expansion. The article analyses the coefficient of linear thermal expansion of stone masonry under the conditions of its operation in different temperature and climatic conditions, including different humidity.

*Aim.* To obtain the dependence of the coefficient of linear thermal expansion on masonry humidity at freezing temperatures by comparing the results of studies of wet masonry samples.

*Materials and methods.* The study is based on the data of M.A. Mury published in his work "Temperature deformations of wet brickwork" and some of his previously unpublished data. Regression analysis was used to perform the research.

*Results.* There were obtained graphical and mathematical dependences of the coefficient of thermal expansion of masonry in the form of piecewise linear functions at freezing temperatures, with account of material humidity.

*Conclusions.* The presented dependences can be used in calculations of the stress-strain state of masonry structures with the use of modern program complexes. Published data on the coefficient of linear thermal

expansion of masonry show a wide range of their values, which indicates fragmentary research based on the use of ceramic stones from a single manufacturer. Therefore, large-scale research with systematization of the results with a logically justified maximum number of varying parameters of masonry should be carried out, with subsequent amendments to the norms of design and construction of masonry structures based on the results of the research.

**Keywords:** coefficient of linear thermal expansion, masonry at freezing, mass humidity

**For citation:** Titaev V.A., Cherny I.A., Sokolov B.S., Titaev D.V. On the coefficient of linear thermal expansion of wet masonry at freezing temperatures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):139–147. [In Russian]. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-139-147](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-139-147)

#### Authors contribution statement

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

#### Funding

No funding support was obtained for the research.

#### Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

#### Acknowledgements

The authors would like to thank the author of the work "Temperature deformations of wet brickwork", Mikhail A. Muryim, for providing laboratory research materials used in this paper.

Received 22.05.2024

Revised 17.06.2024

Accepted 20.06.2024

Каменная кладка является конструктивно неоднородным материалом, в котором основной объем занимает керамический камень, имеющий весьма разнообразный минеральный состав, в котором присутствуют кристаллические новообразования, стеклофаза, остатки исходных тугоплавких компонентов, характеризующиеся коэффициентами термического расширения. Чем более неоднороден минералогический состав камня, тем больше вероятность появления начальных микротрещин в керамическом камне при перепадах температуры в процессе его работы в составе кладки. Микротрещины в камне могут появиться уже в период остывания после термической обработки в процессе его изготовления (при нарушении технологии изготовления).

Любой строительный материал, включая каменную кладку, испытывает деформации (изменяет объем и линейные размеры) при нагреве или охлаждении. Величина этих деформаций зависит от коэффициента теплового расширения – физической величины, характеризующейся относительным изменением линейных размеров каменной кладки с изменением температуры на 1 °С (К).

Смысл коэффициента линейной термической деформации (КЛТД) характеризует выражение:

$$\alpha_t = \frac{l_T - l_0}{l_T(T - T_0)} = \frac{1}{l_0} \frac{dl}{dT}, \quad (1)$$

где  $l_0$  – исходный размер образца;

$l_T$  – размер образца после нагрева;

$T_0$  – исходная температура;  
 $T$  – конечная температура нагрева.

Значения КЛТД для кладки приведены в российских и зарубежных нормах: СП 15.13330.2020 [1], СП 327.1325800.2017 [2], EN 1996-1-1 [3]. Исследованиям КЛТД каменной кладки посвящены работы [4–6] и др.

Для удобства сравнения значений КЛТД кладки в воздушно-сухом состоянии данные из различных источников сведены в табл. 1. Ввиду того, что каменная кладка является конструктивно неоднородным материалом с явно выраженными ортотропными свойствами, приведены значения КЛТД поперек и вдоль рядов кладки.

В данной статье использованы материалы лабораторных исследований КЛТД кирпичных кладок, приведенные в работе [6], а также материалы, в нее не включенные.

Каменная кладка является двухкомпонентным композитным материалом. Для определения его средневзвешенного значения КЛТД воспользуемся формулой, предложенной Г. И. Горчаковым в работе [7] для пористого материала, применительно к каменной кладке, включающей два разнородных материала (кирпич и кладочный раствор):

$$\alpha_{dry}^x = \frac{\alpha_{tb} \times V_b \times K_b + \alpha_{tm} \times V_m \times K_m}{V_b \times K_b + V_m \times K_m}, \tag{2}$$

где  $\alpha_{tb}$ ,  $\alpha_{tm}$  – КЛТД кирпича и раствора;

$V_b$ ,  $V_m$  – объем, занимаемый кирпичами и раствором в образце кладки;

КТД – модуль объемной деформации кирпича;

$$K_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\vartheta_m)} - \text{модуль объемной деформации раствора кладки;}$$

$$K_b = \frac{E_b}{3(1 - 2\vartheta_b)} - \text{модуль объемной деформации раствора кладки;}$$

$E_b$ ,  $E_m$  – модули деформации кирпича и раствора;

$\vartheta_b$ ,  $\vartheta_m$  – коэффициенты Пуассона кирпича и раствора.

Подставляя значения полученных механических и геометрических характеристик лабораторных образцов из эксперимента в работе [6], получим:

$$\alpha_{tb} = 5,5 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ из [8], } \alpha_{tm} = 10 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1} \text{ по данным работы [8]; } V_b = 0,1014 \text{ м}^3, V_m = 0,0209 \text{ м}^3;$$

$$E_b = 4000 \text{ МПа, } E_m = 10\,000 \text{ МПа; } \vartheta_b = 0,15, \vartheta_m = 0,2; K_b = \frac{4000}{3(1 - 2 \times 0,15)} = 1905 \text{ МПа,}$$

$$K_m = \frac{10\,000}{3(1 - 2 \times 0,2)} = 5555 \text{ МПа;}$$

Таблица 1

**Коэффициент линейной термической деформации (КЛТД)**

Table 1

**Coefficient of linear thermal expansion (CLTE)**

КЛТД, 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Работа [4]	Работа [6]		Работа [5]	СП 15.13330.2020 [1]	СП 327.1325800.2017 [2]	EN 1996-1-1 [3]
		полноте- лый	щеле- вой				
$\alpha_{dry}$	6,0	7,2	6,5	6,6	5	6,5	4–8
$\alpha_{dry}$	4,5	7,4	7,2				

$$\alpha_{dry}^x = \frac{5,5 \times 10^{-6} \times 0,1014 \times 1905 + 10 \times 10^{-6} \times 0,0209 \times 5555}{0,1014 \times 1905 + 0,0209 \times 5555} = 7,19 \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}.$$

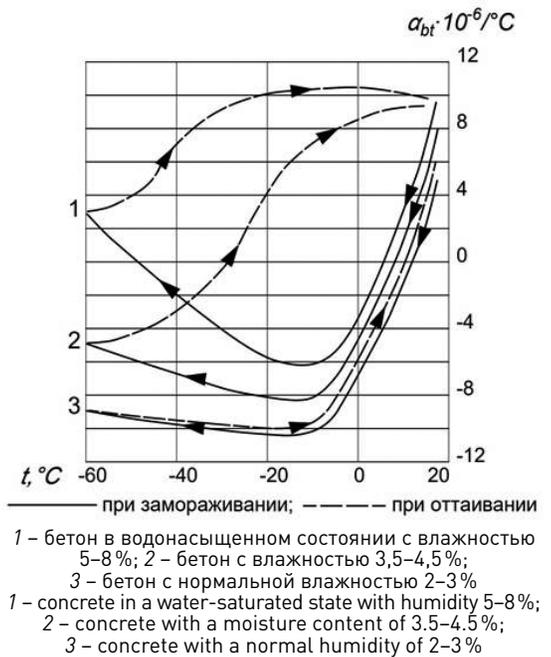
Рассчитанное значение КЛТД практически совпадает с экспериментальными данными из работы [6] для кладки из полнотелого керамического кирпича (табл. 1), что может служить подтверждением достоверности результатов экспериментальных исследований автора.

Для пористых материалов, таких как каменная кладка или бетон, их КЛТД при увлажнении с последующим замораживанием не является неизменным.

Многие исследователи КЛТД бетона при его замораживании при различных значениях влажности отмечают, что графики зависимости деформаций при его замораживании носят криволинейный характер. Обширные исследования свойств замороженного бетона проведены и представлены в работе [9], исследованиям бетонов при замораживании посвящены труды ряда других исследователей.

Криволинейный характер развития деформаций бетона при замораживании объясняется фазовым переходом воды, находящейся в порах и капиллярах, из одного агрегатного состояния в другое. Рост кристаллов водяного льда сопровождается увеличением его объема, а также изменением соотношения и миграцией влаги в различных фазах (лед, переохлажденная вода и пар) в порах. При этом процессы миграции влаги наряду с температурой замораживания существенно изменяют соотношение указанных фазовых состояний в каждый момент времени. То есть термонапряженное состояние замораживаемого бетона является нестационарным. Кроме того, при определенных соотношениях влажности и отрицательной температуры бетона КЛТД является отрицательным. То есть при охлаждении линейные размеры бетонного образца могут увеличиваться. Покажем в качестве примера приведенный в СП 52-105-2009 [10] рисунок с графиками для определения КЛТД (рис. 1), по которым можно определить значения КЛТД при замораживании и оттаивании для различных значений влажности бетона при разных температурах.

Исследований каменной кладки при отрицательной температуре крайне мало. Работа автора М. А. Мурого [6] позволяет судить о значительных изменениях КЛТД для кладок из различных камней на цементно-песчаном растворе при различных значениях ее влажности и отрицательных температурах. На рис. 2 показаны лабораторные образцы кладки из силикатных и керамических камней, на которых проводились исследования КЛТД. Графическая интерпретация



**Рис. 1.** КЛТД бетона на портландцементе с силикатным заполнителем

**Fig. 1.** CLTE of concrete on Portland cement with silicate aggregate



**Рис. 2.** Вид лабораторных образцов для исследования КЛТД, индикаторы часового типа  
**Fig. 2.** Type of laboratory samples for CLTE research, dial indicators

результатов исследований КЛТД кладки из керамических полнотелых и щелевых кирпичей на цементно-песчаном растворе показана в табл. 2.

При статистической обработке результатов экспериментальных данных получены универсальные кусочно-линейные функции для определения КЛТД каменной кладки из полнотелого и щелевого керамического кирпича. В табл. 2 представлены функции КЛТД двух переменных ( $w$  – влажности и  $T$  – температуры). Учтен тот факт, что кладка является конструктивно-ортоотропным материалом. Функции КЛТД вдоль рядов и поперек рядов кладки различны.

Исследования КЛТД в работе [6] были ограничены техническими возможностями при замораживании образцов и ограничивались температурой минус 20 °С. Проявления эффекта гистерезиса при определении КЛТД (при полном цикле замораживания и оттаивания) кладки, который имеется у бетона, не выявлено. Но это не означает, что он не будет выявлен при замораживании кладки до более низких температур и исследованиях кладки из камней других материалов и других заводов-производителей.

## Вывод

На основании данных экспериментальных исследований образцов каменной кладки, приведенных в работе [6], получены графические и эмпирические математические зависимости КЛТД в виде кусочно-линейных функций двух переменных для замораживаемой кладки при ее влажности в диапазоне от воздушно-сухой до  $w = 12\%$ . Данные функции позволяют задавать КЛТД каменных конструкций в явном виде при расчетах на термические воздействия с использованием современных программных комплексов для математического анализа.

Таблица 2

**КЛТД кладки из полнотелых и щелевых керамических кирпичей**

Table 2

**CLTE of masonry made of solid and slotted ceramic bricks**

Тип	Коэффициент линейной термической деформации (КЛТД), °С <sup>-1</sup>	
	Вдоль рядов кладки (по X)	Поперек рядов кладки (по Z)
Кирпич керамический щелевой		
	$\alpha_{tw}^x = \begin{cases} \alpha_{neg}^x, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^x, & T \geq 0 \end{cases}$ <p>где <math>\alpha_{neg}^x = \alpha_{dry}^x \begin{cases} 1, &amp; w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{11,3(3)}, &amp; 1,2 &lt; w \leq 8 \\ 1,6 + \frac{w-8}{80}, &amp; 8 &lt; w \leq 12 \end{cases}</math></p>	$\alpha_{tw}^z = \begin{cases} \alpha_{neg}^z, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^z, & T \geq 0 \end{cases}$ <p>где <math>\alpha_{neg}^z = \alpha_{dry}^z \begin{cases} 1, &amp; w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{11,74}, &amp; 1,2 &lt; w \leq 12 \end{cases}</math></p>
Кирпич керамический полнотелый		
	$\alpha_{tw}^x = \begin{cases} \alpha_{neg}^x, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^x, & T \geq 0 \end{cases}$ <p>где <math>\alpha_{neg}^x = \alpha_{dry}^x \begin{cases} 1, &amp; w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{28,3}, &amp; 1,2 &lt; w \leq 12 \end{cases}</math></p>	$\alpha_{tw}^z = \begin{cases} \alpha_{neg}^z, & T < 0 \\ \alpha_{dry}^z, & T \geq 0 \end{cases}$ <p>где <math>\alpha_{neg}^z = \alpha_{dry}^z \begin{cases} 1, &amp; w = 1,2 \\ 1 + \frac{w-1,2}{17,3}, &amp; 1,2 &lt; w \leq 12 \end{cases}</math></p>
<p>где w – массовая влажность кладки в процентах;  <math>\alpha_{tw}^z, \alpha_{tw}^x</math> – коэффициенты линейной термической деформации кладки с влажностью w поперек и вдоль рядов кладки соответственно;  <math>\alpha_{dry}^z, \alpha_{dry}^x</math> – коэффициенты линейной термической деформации кладки в воздушно-сухом состоянии (w ≈ 1,2%), °С<sup>-1</sup>, поперек и вдоль рядов кладки соответственно.</p>		

## Список литературы

1. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Москва: Минстрой России; 2020.
2. СП 327.1325800.2017. Стены наружные с лицевым кирпичным слоем. Правила проектирования, эксплуатации и ремонта. Москва: Минстрой России; 2020.
3. EN 1996-1-1: (Eurocodes). Design of masonry structures. General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Brussels; 2005.
4. *Зимин С.С.* Напряженно-деформированное состояние лицевого слоя многослойных каменных стен при климатических температурных воздействиях [диссертация]. Санкт-Петербург; 2020.
5. *Ищук М.К.* Анализ напряженно-деформированного состояния кладки лицевого слоя наружных стен. Жилищное строительство. 2008;(4):23–28.
6. *Мурый М.А.* Температурные деформации влажной кирпичной кладки. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008;(1):79–85.
7. *Горчаков Г.И.* Коэффициенты температурного расширения и температурные деформации строительных материалов. Москва: Изд-во Комитета стандартов, мер и измерительных приборов при Совмине СССР; 1968.
8. *Кожевников И.Г., Новицкий Л.А.* Теплофизические свойства материалов при низких температурах: Справочник. 2-е изд. Москва: Машиностроение; 1982.
9. *Мазур Б.М.* Температурные деформации бетонов при низких отрицательных температурах и их влияние на долговечность железобетона [диссертация]. Москва; 1964.
10. СП 52-105-2009. Железобетонные конструкции в холодном климате и на вечномёрзлых грунтах. Москва: ФГУП «НИЦ «Строительство»; 2009.

## References

1. SP 15.13330.2020. Masonry and reinforced masonry structures. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
2. SP 327.1325800.2017. Exterior masonry walls with brick veneer. Rules of design, operation and repair. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
3. EN 1996-1-1: (Eurocodes). Design of masonry structures. General rules for reinforced and unreinforced masonry structures. Brussels; 2005.
4. *Zimin S.S.* Stress-strain state of the front layer of multilayer stone walls under climatic temperature influences [dissertation]. Saint Petersburg; 2020. (In Russian).
5. *Ishchuk M.K.* Analysis of the stress-strain state of the masonry of the front layer of external walls. Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing Construction. 2008;(4):23–28. (In Russian).
6. *Mury M.A.* Temperature deformations of wet brickwork. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture. 2008;(1):79–85. (In Russian).
7. *Gorchakov G.I.* Thermal expansion coefficients and temperature deformations of building materials. Moscow: Publishing House of the Committee of Standards, Measures and Measuring Instruments under the USSR Council of Ministers; 1968. (In Russian).
8. *Kozhevnikov I.G., Novitsky L.A.* Thermophysical properties of materials at low temperatures. Handbook. 2nd ed. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1982. (In Russian).
9. *Mazur B.M.* Temperature deformation of concrete at low negative temperatures and their influence on the durability of reinforced concrete [dissertation]. Moscow; 1964. (In Russian).
10. SP 52-105-2009. Concrete structures for cold climate and permafrost soil. Moscow: FSUE Research Center of Construction; 2009. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

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

e-mail: titaev@bk.ru

тел.: +7 (499) 174-74-92

**Vitaly A. Titaev**<sup>✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of the Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: titaev@bk.ru

tel.: +7 (499) 174-74-92

**Иван Александрович Черный**, инженер лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; магистрант Института промышленного и гражданского строительства, НИУ МГСУ, Москва

e-mail: kron\_975@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-00

**Ivan A. Cherny**, Engineer of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Master's student of the Institute of Industrial and Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: kron\_975@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-74-00

**Борис Сергеевич Соколов**, канд. техн. наук, заведующий лабораторией тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: moo-shell@mail.ru

тел.: +7 (499) 174-74-80

**Boris S. Sokolov**, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: moo-shell@mail.ru

tel.: +7 (499) 174-74-80

**Денис Витальевич Титаев**, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва

e-mail: titaev-d@bk.ru

тел.: +7 (499) 324-77-77

**Denis V. Titaev**, Postgraduate student, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow

e-mail: titaev-d@bk.ru

tel.: +7 (499) 324-77-77

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.012.082: 624.042.5

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-148-157](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-148-157)

EDN: DISGMI

# ДЛИНА ТЕМПЕРАТУРНОГО БЛОКА ЗАМОРАЖИВАЕМОЙ ВЛАЖНОЙ ОБЛИЦОВОЧНОЙ КЛАДКИ

В.А. ТИТАЕВ<sup>1,2,✉</sup>, канд. техн. наук

И.А. ЧЕРНЫЙ<sup>1,2</sup>

Д.В. ТИТАЕВ<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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

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

<sup>3</sup> Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Каширское шоссе, д. 31, г. Москва, 115409, Российская Федерация

## Аннотация

**Введение.** Внешним слоем наружных стен является облицовочная каменная кладка, испытывающая сложное напряженно-деформированное состояние при восприятии собственного веса кладки, климатических нагрузок и воздействий (действия ветрового давления, влажности и температуры воздуха). Анализ имеющихся результатов исследований, а также требований нормативных документов показал, что они не учитывают температурные деформации увлажненной кладки при замерзании. В связи с этим авторами проведены исследования по оценке влияния данного воздействия на напряженно-деформированное состояние облицовочной кладки.

**Цель.** Получение универсальной зависимости длины температурного блока облицовочной кладки, в том числе при ее замораживании.

**Материалы и методы.** Материалом исследования является облицовочная каменная кладка (облицовочный слой) многослойных наружных стен зданий, моделируемая в программном комплексе ЛИРА-САПР, реализующем метод конечных элементов в форме метода перемещений. В данной статье использованы данные из работы М.А. Мурого «Температурные деформации влажной кирпичной кладки», опубликованной в 2008 году.

**Результаты.** На основании анализа термонапряженного состояния кладки, полученного в ходе численного моделирования, получена эмпирическая зависимость длины температурного блока облицовочной каменной кладки для наружных многослойных стен. Предложено логически обоснованное конструктивное решение узла облицовочной кладки с антифрикционным сопряжением ее с плитой перекрытия.

**Выводы.** На длину температурного блока кладки, опираясь на результаты исследования, оказывает влияние не только перепад температур и жесткость опорной конструкции, но и влажностные условия ее эксплуатации. При повышении влажности кладки от 6 до 12 % расчетная длина температурного блока существенно снижается. Длины температурных блоков, назначаемые по существующим методикам (включая методики норм проектирования), имеют завышенное значение, что существенно снижает долговечность облицовочной кладки, а также в ряде случаев может привести к ее разрушению.

**Ключевые слова:** коэффициент линейной температурной деформации, облицовочная кладка, длина температурного блока, влажность кладки, каменная кладка при заморозке

**Для цитирования:** Титаев В.А., Черный И.А., Титаев Д.В. Длина температурного блока замораживаемой влажной облицовочной кладки. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024;42(3):148–157. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-148-157](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-148-157)

### **Вклад авторов**

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

### **Финансирование**

Исследование не имело спонсорской поддержки.

### **Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 27.05.2024

Поступила после рецензирования 21.06.2024

Принята к публикации 27.06.2024

## **THE TEMPERATURE BLOCK LENGTH FOR THE WET FACING MASONRY UNDER FREEZING**

V.A. TITAEV<sup>1,2,✉</sup>, Cand. Sci. (Engineering)

I.A. CHERNY<sup>1,2</sup>

D.V. TITAEV<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 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

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

<sup>3</sup> National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye Shosse, 31, Moscow, 115409, Russian Federation

### **Abstract**

*Introduction.* The outer layer of exterior walls is the facing masonry, experiencing a complex stress-strain state when taking its own weight, climatic loads, and exposures (wind pressure, humidity, and air temperature). An analysis of available research results, as well as the requirements of regulatory documents showed that no consideration is given to the temperature deformations of wet masonry when freezing. In this regard, the studies were conducted to assess the impact of this effect on the stress-strain state of the facing masonry.

*Aim.* To obtain a universal dependence of the temperature block length of the facing masonry, including its freezing.

*Materials and methods.* The study is applied to the facing masonry (facing layer) of multilayer exterior walls of buildings, modeled in the LIRA-CAD software package, which implements the finite element method in the form of displacement method. The research results of the work of M.A. Mury "Temperature deformations of wet brickwork" (2008) are used here.

*Results.* An empirical dependence of the temperature block length of the facing masonry for exterior multilayer walls is obtained based on the analysis of the thermal stress state of the masonry resulting from numerical calculation. A logically justified structural solution of the facing masonry unit with antifriction interface with the floor slab is proposed.

*Conclusions.* According to the results, the length of the masonry temperature block is not only affected by the temperature difference and the stiffness of the supporting structure, but also by the humidity conditions of its operation. When the humidity of the masonry increases from 6 to 12 %, the design length of the temperature block significantly decreases. The lengths of temperature blocks, set according to existing methods (including methods of design standards), have an overestimated value, and thus the durability of facing masonry is essentially reduced, or even destructed in a number of cases.

**Keywords:** coefficient of linear temperature expansion, facing masonry, temperature block length, humidity of masonry, masonry at freezing

**For citation:** Titaev V.A., Cherny I.A., Titaev D.V. The temperature block length for the wet facing masonry under freezing. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2024;42(3):148–157. (In Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3\(42\)-148-157](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2024-3(42)-148-157)

#### **Authors contribution statement**

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

#### **Funding**

No funding support was obtained for the research.

#### **Conflict of interest**

The authors declare no conflict of interest.

*Received 27.05.2024*

*Revised 21.06.2024*

*Accepted 27.06.2024*

## **Введение**

При современном строительстве широко применяются многослойные наружные стены [1–5], выполняющие роль ограждающих конструкций и предназначенные для тепло- и звукоизоляции внутреннего микроклимата зданий. В качестве наружного облицовочного слоя находит применение каменная кладка, которая выполняет роль препятствия для инфильтрации наружного воздуха, фасадно-декоративного элемента с определенной архитектурной выразительностью и конструкции, воспринимающей и передающей на внутреннюю несущую часть стены ветровую нагрузку.

Наружный каменный облицовочный слой стены (далее – облицовочная кладка) испытывает сложное напряженно-деформированное состояние при восприятии гравитационных, ветровых и климатических воздействий. Силовые (гравитационные и ветровые воздействия) не вызывают у нас интереса ввиду их подробной изученности большим числом исследователей. Восприятие климатических (в первую очередь температурных и влажностных) воздействий часто вызывает сложности при проектировании каменной облицовки.

Исследованием работы облицовочной кладки занимались многие ученые как в России [1–9], так и за рубежом [10–14]. Конструктивные решения сопряжения облицовочной кладки с опорной конструкцией имеют существенные различия в зарубежной и отечественной практике проектирования. Данные отличия обусловлены в первую очередь климатическими особенностями районов строительства. В массовом гражданском строительстве в России высота наружных стен и соответственно облицовочной кладки принимается 3–4,5 м, то есть высота облицовочной кладки определяется высотой этажа здания. По данным исследований [3, 4, 7–9], основным фактором, влияющим на напряженно-деформированное состояние облицовочной кладки, является изменение ее температуры. Основной механической характеристикой, используемой при расчетах по образованию трещин и разрушению кладки, является ее прочность на растяжение. Прочность кладки на растяжение по перевязанному сечению (вдоль рядов кладки) является критерием при расчетном обосновании длины температурного блока (расстояние между температурными деформационными швами).

При свободной деформации кладки напряжений в ней не возникает. Однако реальная кладка всегда опирается на железобетонную плиту, в результате облицовка испытывает стесненную деформацию, что обуславливает появление напряжений при изменении ее температуры. В результате этой совместной работы кладки и плиты при охлаждении кладки возможно появление в ней трещин при растягивающих нормальных напряжениях, превышающих прочность кладки на растяжение.

Исследователями разработаны различные рекомендации по назначению длины температурных блоков, но ряд этих рекомендаций применим только в определенных климатических условиях. Однако есть и универсальные, в частности в работе [10], а также в работе [6] и нормативном документе СП 327.1325800.2017 [15] длину температурного блока определяют по эмпирическим формулам.

Нами также проведены исследования напряженно-деформированного состояния узла сопряжения облицовочной каменной кладки с железобетонной плитой перекрытия. Моделирование выполнялось при помощи программного комплекса ЛИРА-САПР. В компьютерной модели учтено наличие в плите термовкладышей, позволяющих снизить потери тепла через рассматриваемый узел. Исследовались предельно допустимые значения длины температурного блока при воздействии различных факторов. Критерием для проводимых нами исследований выбрано, как и в работах [6, 10], непревышение горизонтальными растягивающими нормальными напряжениями прочности кладки на растяжение –  $\sigma_x \leq R_t$ . Расчетное сопротивление кладки на растяжение по перевязанному сечению  $R_t$  принято по СП 15.13330.2020 [16].

В результате исследования получено выражение длины температурного блока, зависящее от величины температуры охлаждения кладки, прочностных и деформативных характеристик кладки и способа ее опирания:

$$L = 1 - \frac{k \times \delta}{\Delta t_{red} \times \alpha_{dry}^x}, \quad (1)$$

где  $k = \frac{R_t}{E_{mas}^x}$ ;

$R_t$  – сопротивление кладки на растяжение по перевязанному сечению, проходящему по камню, МПа;

$E_{mas}^x$  – модуль деформации кладки, МПа;

$\delta$  – условная жесткостная характеристика сопряжения кладки с основанием, при непосредственном опирании кладки на плиту перекрытия следует принимать равной  $15 \frac{\text{МПа}}{\text{МПа}}$  м;

$\alpha_{dry}^x$  – КЛТД (коэффициент линейной температурной деформации) кладки в воздушно-сухом состоянии;

$\Delta t_{red}$  – расчетное приведенное значение перепада температуры, °С, определяемое по СП 20.13330.2016 [17], но с учетом изменения КЛТД кладки при ее замораживании:

$$\Delta t_{red} = t_w - t_{0c} \frac{\alpha_{tw}^x}{\alpha_{dry}^x}, \quad \Delta t_{red} = t_c \frac{\alpha_{dry}^x}{\alpha_{tw}^x} - t_{0w}, \quad (2)$$

где  $t_w, t_c$  – нормативные значения средних температур по сечению элемента соответственно в теплое и холодное время года;

$t_{0w}, t_{0c}$  – начальные температуры соответственно в теплое и холодное время года или температура замыкания кладки;

$\alpha_{tw}^x$  – КЛТД кладки во влажном состоянии по данным работы [18];

индекс «x» в обозначениях элементов формул означает горизонтальное направление (т. е. вдоль рядов кладки).

Помимо выражения (1), получен ряд зависимостей, которые позволяют оценить влияние на длину температурного блока облицовочной кладки различных факторов.

Для сравнения формулы, определяющие длины температурных блоков облицовочной кладки, из источников [6, 11] и формула (1) приведены в таблице.

На рис. 1 показан график зависимости длины температурного блока от соотношения

$$\text{КЛТД кладки и опорной железобетонной плиты } \frac{\alpha_{t,mas}^x}{\alpha_{t,plate}^x}.$$

На рис. 2 представлены графики сравнения длин температурного блока кладки в зависимости от влажности и перепада температур  $\Delta t = -50$  °С, где температура охлаждения

Таблица

**Длина температурного блока облицовочной каменной кладки**

Table

**Temperature block length of the facing masonry**

М. К. Ищук [6]	P. Schubert [11]	И. А. Черный, В. А. Титаев
$L_x \leq \frac{N}{\beta \times A \times E_{кл} \times \Delta_t \times \alpha_t} + b$	$l_m \leq -\ln \left( 1 - \frac{\beta_{z,mw}}{E_{z,mw} \times \varepsilon \times R} \right) \frac{h_{mw}}{0,23}$	$L = 1 - \frac{k \times \delta}{\Delta t_{red} \times \alpha_{dry}^x}$
<p>где <math>b</math> – параметр, характеризующие материал кладки, учитывающие влияние температуры при возведении кладки и температуры плиты перекрытия в эксплуатационный период, солнечной радиации, концентрацию напряжений на опоре и вблизи проемов;  <math>A</math> – площадь вертикального сечения лицевого слоя, включаемая в работу с плитой перекрытия, принимаемая равной 0,8 м;  <math>E_{кл}</math> – модуль деформаций кладки;  <math>\Delta_t</math> – разность температуры с момента замыкания конструкции и температуры в рассматриваемый период времени;  <math>\alpha_t</math> – КЛТД кладки;  <math>N</math> – горизонтальное усилие, определяемое для случая наступления предельного состояния в кладке <math>N(R_t) = R_t \times A</math> и для случая образования первых трещин <math>N(\sigma_{t,scr}) = 0,6R_{t,ult} \times A</math>;  <math>R_t</math> – расчетное сопротивление кладки растяжению по горизонтали;  <math>R_{t,ult}</math> – временное сопротивление кладки растяжению по горизонтали</p>	<p>где <math>\beta_{z,mw}</math> – прочность кладки на растяжение вдоль горизонтальных растворных швов;  <math>E_{z,mw}</math> – модуль упругости кладки при растяжении вдоль горизонтальных растворных швов;  <math>\varepsilon</math> – полные температурные деформации кладки с учетом ее реологии;  <math>R</math> – коэффициент, учитывающий влияние сил трения на контакте лицевого слоя с опорой (например, при возведении кладки непосредственно на железобетонной плите перекрытия <math>R = 1,0</math>, при ее возведении на скользящей прослойке из полиэтиленовой пленки или рубероида <math>R = 0,6</math>);  <math>h_{z,mw}</math> – высота стены</p>	<p>где <math>k = \frac{R_t}{E_{mas}^x}</math>;  <math>R_t</math> – сопротивление кладки на растяжение по перевязанному сечению, проходящему по камню, МПа;  <math>E_{mas}^x</math> – модуль деформации кладки, МПа;  <math>\delta</math> – условная жесткостная характеристика сопряжения кладки с основанием, при непосредственном опирании кладки на плиту перекрытия следует принимать равной <math>15 \frac{\text{МПа}}{\text{МПа} \cdot \text{м}}</math>;  <math>\alpha_{dry}^x</math> – КЛТД кладки в воздушно-сухом состоянии (<math>w \approx 1,2\%</math>), °С<sup>-1</sup>, вдоль рядов кладки;  <math>\Delta t_{red}</math> – расчетное приведенное значение перепада температуры, °С</p>

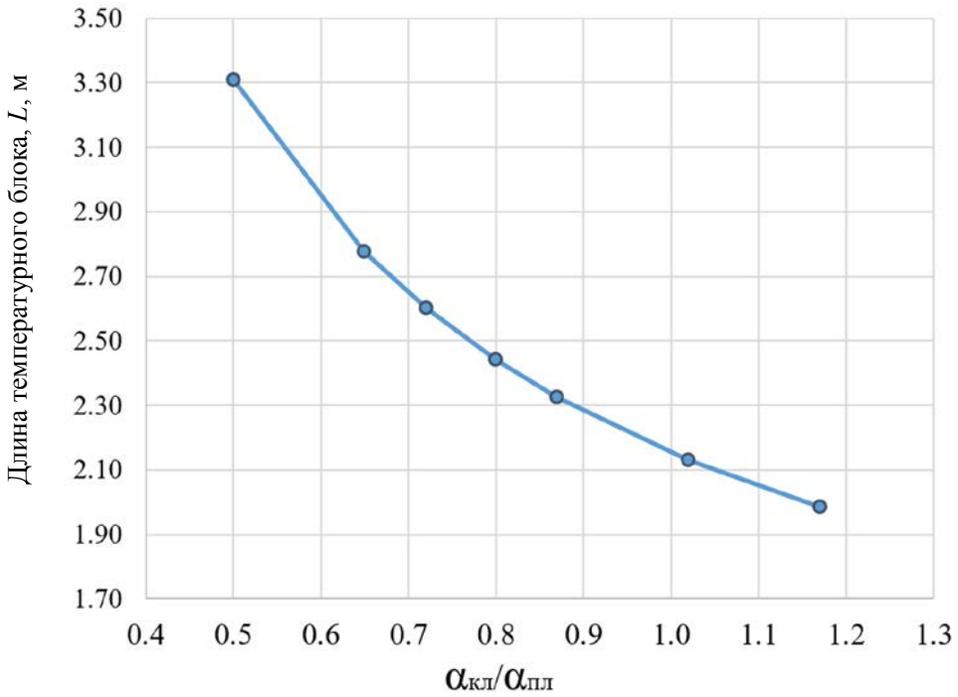


Рис. 1. График длины температурного блока лицевой кладки от соотношения КЛТД кладки и КЛТД железобетонного основания

Fig. 1. Temperature block length of facing masonry depending on the ratio of CLTE of masonry and CLTE of reinforced concrete foundation

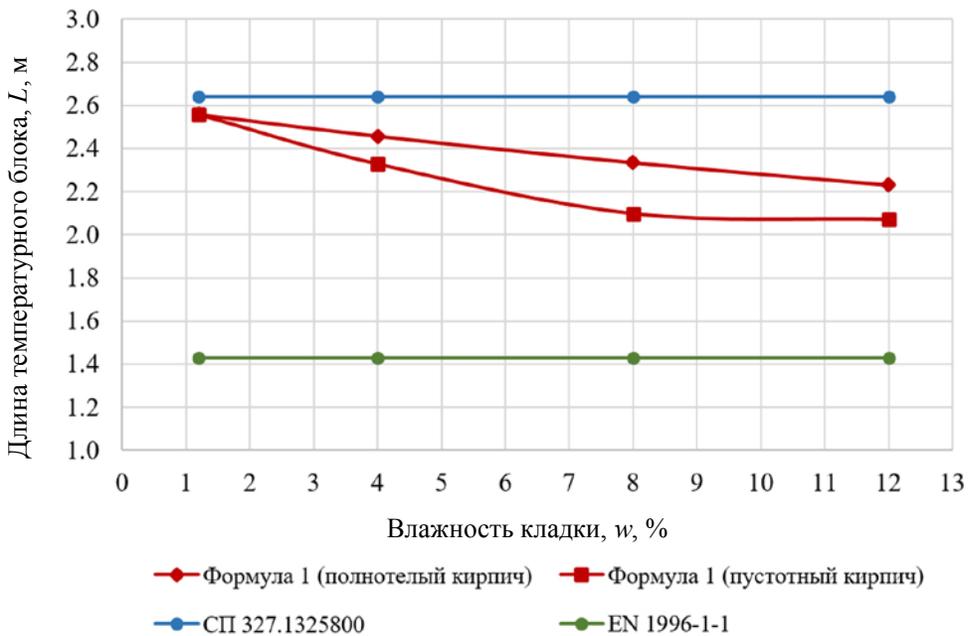


Рис. 2. Зависимость длины температурного блока лицевой кладки от ее влажности при замораживании

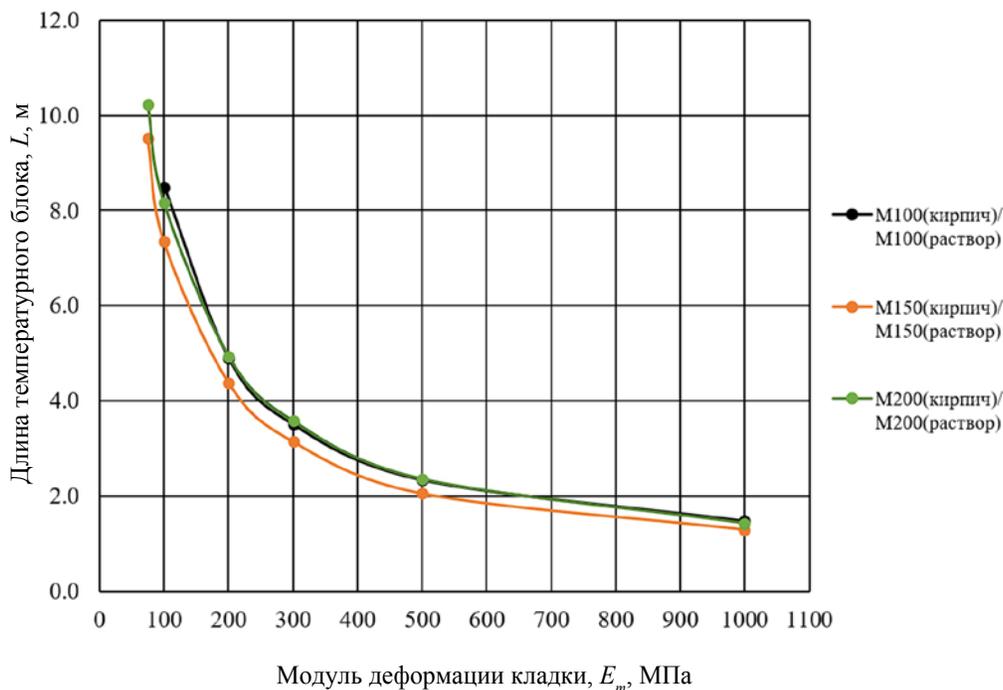
Fig. 2. Dependence of the temperature block length of the facing masonry on its humidity when freezing

составляет  $T = -35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что соответствует условиям ряда регионов Центральной России. Графики, построенные по формуле (1), учитывают изменение КЛТД кладки при ее замораживании по данным исследований работы [18].

Для сравнения на этом рисунке показаны значения длины температурного блока: по методике работы [6] и СП 327.1325800.2017 [15]  $L = 2,64\text{ м}$ , по формуле из работы [10]  $L = 1,43\text{ м}$ , по формуле (1)  $L = 2,56\text{ м}$  (в воздушно-сухом состоянии каменной кладки) и уменьшается (на 13% меньше) до 2,23 м (для кладки из полнотелого керамического кирпича) и (на 19% меньше) до 2,07 м (для кладки из щелевого керамического кирпича) при влажности кладки 12%.

На рис. 3 показаны графики зависимости длины температурного блока от модуля деформации нижнего растворного шва между облицовочной кладкой и плитой перекрытия для различных марок камня и раствора. Из графиков видно, что длина температурного блока от применяемых для облицовки марок по прочности камня и раствора зависят незначительно. В то же время наблюдаем существенную зависимость от жесткости шва, при минимальной его жесткости имеем на графике максимальную длину температурного блока.

Для реализации возможности иметь повышенную длину температурного блока облицовочной кладки авторами разработана конструкция, при которой податливость контакта кладки с плитой максимальна. Достигается она путем применения антифрикционной прокладки между плитой перекрытия и облицовочной кладкой (рис. 3). Прокладка представляет собой лист фторопласта по ГОСТ 10007-80 [19] и уложенного поверх него листа оцинкованной



**Рис. 3.** Семейство графиков длины температурного блока лицевой кладки в зависимости от модуля деформации нижнего растворного шва  
**Fig. 3.** Family graphs of the temperature block length of the facing masonry as a function of the modulus of deformation of the lower mortar joints

стали по ГОСТ 14918-2020 [20]. Такое сочетание материалов имеет коэффициент трения 0,04–0,1. За счет прокладки достигается скольжение кладки в горизонтальном направлении, что приводит к существенному снижению растягивающих и отсутствию сдвигающих напряжений в нижней части облицовочной кладки.

## Выводы

В результате исследования облицовочной каменной кладки нами получены следующие выводы:

1. Получено выражение длины температурного блока, зависящее от величины температуры охлаждения кладки, прочностных и деформативных характеристик кладки и способа ее опирания.
2. Получены графические зависимости длины температурного блока облицовочной кладки от соотношения КЛТД кладки и опорной железобетонной плиты, а также от модуля деформации нижнего растворного шва для различных соотношений марок по прочности камня и кладочного раствора.
3. Разработано конструктивное решение узла сопряжения многослойной наружной стены с плитой перекрытия, при реализации которого можно иметь практически неограниченную длину температурного блока каменной облицовки.

## Список литературы

1. Избицкая Ю.С., Калошина С.В. Конструктивные решения многослойных стен из кирпича. Современные технологии в строительстве. Теория и практика. 2019;2:145–150.
2. Орлович Р.Б., Горшков А.С., Зимин С.С. Применение камней с высокой пустотностью в облицовочном слое многослойных стен. Инженерно-строительный журнал. 2013;(8):14–23.
3. Орлович Р.Б., Рубцов Н.М., Зимин С.С. О работе анкеров в многослойных ограждающих конструкциях с наружным кирпичным слоем. Инженерно-строительный журнал. 2013;(1):3–11.
4. Зимин С.С. Напряженно-деформированное состояние лицевого слоя многослойных каменных стен при климатических температурных воздействиях [диссертация]. Санкт-Петербург; 2020.
5. Ищук М.К. Анализ напряженно-деформированного состояния кладки лицевого слоя наружных стен. Жилищное строительство. 2008;(4):23–28.
6. Ищук М.К. Прочность и трещиностойкость каменной кладки наружных многослойных стен [диссертация]. Москва; 2019.
7. Ищук М.К. Учет совместной работы кирпичной кладки лицевого слоя наружных стен и плиты перекрытия. Промышленное и гражданское строительство. 2018;(8):50–56.
8. Ищук М.К., Ищук В.Л., Шапиро Г.И. Механизм образования трещин в кладке лицевого слоя наружных стен при температурных воздействиях. Строительство и реконструкция. 2021;(2):14–27. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-94-2-14-27>
9. Черный И.А. Конструктивная адаптация идеи увеличения длины температурного блока облицовочной кладки. В: Дни студенческой науки: сборник докладов науч.-техн. конф. по итогам науч.-исслед. работ студентов института промышленного и гражданского строительства, Москва, 27 февр. – 03 марта 2023 г. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет; 2023, с. 38–40.
10. Schubert P. Vermeiden von schädlichen Rissen in Mauerwerkbauteilen. In: Mauerwerk-Kalender. Berlin: Ernst & Sohn; 1996, pp. 621–651.
11. Schubert P. Rißfreie Wandlänge von tragenden, senkrecht zu den Lagerfugen belasteten Mauerwerkswänden aus Porenbetonsteinen: Forschungsbericht № F. 595. Aachen: Institut für Bauforschung; 1999.
12. Brameshuber W., Schubert P., Schmidt U., Hannawald J. Rißfreie Wandlänge von Porenbeton-Mauerwerk. Mauerwerk. 2006;10(4):132–139. <https://doi.org/10.1002/dama.200600279>

13. *Martens D.R.W.* New Method for determining spacing of movement joints in solid unreinforced veneer walls. In: Brick and Block Masonry. Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, 26-30 June 2016. CRC Press; 2016, pp. 255–262. <https://doi.org/10.1201/b21889-29>
14. *Martens D.R.W.* Typical masonry wall enclosures in Belgium and The Netherlands. In: Enclosure Masonry Wall Systems Worldwide. Berlin: CRC Press; 2011, pp. 13–14.
15. СП 327.1325800.2017. Стены наружные с лицевым кирпичным слоем. Правила проектирования, эксплуатации и ремонта. Москва: Минстрой России; 2020.
16. СП 15.13330.2020. Каменные и армокаменные конструкции. Москва: Минстрой России; 2020.
17. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Москва: Стандартинформ; 2018.
18. *Муры́й М.А.* Температурные деформации влажной кирпичной кладки. Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2008;(1):79–85.
19. ГОСТ 10007-80. Фторопласт-4. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2005.
20. ГОСТ 14918-2020. Прокат листовой горячеоцинкованный. Технические условия. Москва: Стандартинформ; 2020.

## References

1. *Izbitskaya Yu.S., Kaloshina S.V.* Constructive solutions for multi-layer brick walls. Modern technologies in construction. Theory and practice. 2019;2:145–150. (In Russian).
2. *Orlovich R.B., Gorshkov A.S., Zimin S.S.* The use of stones with high hollowness in the facing layer of multilayer walls. Magazine of Civil Engineering. 2013;(8):14–23. (In Russian).
3. *Orlovich R.B., Rubtsov N.M., Zimin S.S.* On the work of anchors in multilayer enclosing structures with an outer brick layer. Magazine of Civil Engineering. 2013;(1):3–11. (In Russian).
4. *Zimin S.S.* Stress-strain state of the front layer of multilayer stone walls under climatic temperature influences [dissertation]. St. Petersburg; 2020. (In Russian).
5. *Ishchuk M.K.* Analysis of the stress-strain state of the masonry of the facing layer of external walls. Zhilishchnoe Stroitel'stvo = Housing Construction. 2008;(4):23–28. (In Russian).
6. *Ishchuk M.K.* Strength and crack resistance of masonry external multilayer walls [dissertation]. Moscow; 2019. (In Russian).
7. *Ishchuk M.K.* Taking into account the joint work of the brickwork of the front layer of external walls and the floor slab. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo = Industrial and Civil Engineering. 2018;(8):50–56. (In Russian).
8. *Ishchuk M.K., Ishchuk V.L., Shapiro G.I.* Mechanism of the Formation of Cracks in the Brick Veneer of the Exterior Walls With Flexible Ties Under Temperature Influences. Building and Reconstruction. 2021;(2):14–27. (In Russian). <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-94-2-14-27>
9. *Cherny I.A.* Constructive adaptation of the idea of increasing the length of the temperature block of facing masonry. In: Days of student science: sat. dokl. sci.-tech. conf. based on the results of scientific research. works of students of the Institute of Industrial and Civil Engineering, Moscow, February 27 – March 03, 2023. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2023, pp. 38–40. (In Russian).
10. *Schubert P.* Vermeiden von schädlichen Rissen in Mauerwerkbauteilen. In: Mauerwerk-Kalender. Berlin: Ernst & Sohn; 1996, pp. 621–651.
11. *Schubert P.* Rißfreie Wandlänge von tragenden, senkrecht zu den Lagerfugen belasteten Mauerwerkswänden aus Porenbetonsteinen: Forschungsbericht № F. 595. Aachen: Institut für Bauforschung; 1999.
12. *Brameshuber W., Schubert P., Schmidt U., Hannawald J.* Rißfreie Wandlänge von Porenbeton-Mauerwerk. Mauerwerk. 2006;10(4):132–139. <https://doi.org/10.1002/dama.200600279>
13. *Martens D.R.W.* New Method for determining spacing of movement joints in solid unreinforced veneer walls. In: Brick and Block Masonry. Proceedings of the 16th International Brick and Block Masonry Conference, Padova, Italy, 26-30 June 2016. CRC Press; 2016, pp. 255–262. <https://doi.org/10.1201/b21889-29>
14. *Martens D.R.W.* Typical masonry wall enclosures in Belgium and The Netherlands. In: Enclosure Masonry Wall Systems Worldwide. Berlin: CRC Press; 2011, pp. 13–14.
15. СП 327.1325800.2017. Exterior masonry walls with brick veneer. Rules of design, operation and repair. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).

16. SP 15.13330.2020. Masonry and reinforced masonry structures. Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of the Russian Federation; 2020. (In Russian).
17. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
18. *Mury M.A.* Temperature deformations of wet brickwork. Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo arkhitekturno-stroitel'nogo universiteta = Journal of Construction and Architecture. 2008;(1):79–85. (In Russian).
19. State Standard 10007-80. Polytetrafluoroethylene. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2005. (In Russian).
20. State Standard 14918-2020. Hot-dip zinc-coated steel sheet. Specifications. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).

## Информация об авторах / Information about the authors

**Виталий Александрович Титаев** , канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций, НИУ МГСУ, Москва  
e-mail: titaev@bk.ru  
тел.: +7 (499) 174-74-92

**Vitaly A. Titaev** , Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor, Leading Researcher, Laboratory of the Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Associate Professor, Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow  
e-mail: titaev@bk.ru  
tel.: +7 (499) 174-74-92

**Иван Александрович Черный**, инженер лаборатории тонкостенных и пространственных конструкций, НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство»; магистрант Института промышленного и гражданского строительства, НИУ МГСУ, Москва  
e-mail: kron\_975@mail.ru  
тел.: +7 (499) 174-74-00

**Ivan A. Cherny**, Engineer of the Laboratory for Thin-Walled and Spatial Structures, Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction; Master's student of the Institute of Industrial and Civil Engineering, Moscow State University of Civil Engineering, Moscow  
e-mail: kron\_975@mail.ru  
tel.: +7 (499) 174-74-00

**Денис Витальевич Титаев**, аспирант, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ), Москва  
e-mail: titaev-d@bk.ru  
тел.: +7 (499) 324-77-77

**Denis V. Titaev**, Postgraduate student, National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow  
e-mail: titaev-d@bk.ru  
tel.: +7 (499) 324-77-77

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»  
Вып. 3(42) 2024

Редактор выпуска Починина Н.Е.  
Компьютерная верстка Чорненький С.И.

Дата выхода в свет: 28.09.2024 г. Формат 70×100/16  
Бумага мелованная. Офсетная печать.  
Тираж 500 экз. Заказ № 42151

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