



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

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



ИИЦ
ИИЦ

ИИЦ
ИИЦ

ИИЦ
ИИЦ

№ 1(32) 2022

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

С 1927 ГОДА
95
ЛЕТ



**НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ
СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ**



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

с 1927 года
95
ЛЕТ

ВЕСТНИК

НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 1(32) 2022

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: АО «НИЦ «Строительство»

Адрес редакции: 109428, г. Москва, ул. 2-я Институтская, дом 6, стр. 1
тел.: +7 (495) 602-00-70 доб. 1022 / 1023
e-mail: vestnikstroy@list.ru

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





НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

с 1927 ГОДА
95
ЛЕТ

BULLETIN

of Science and Research Center
of Construction

No. 1(32) 2022

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.

Publisher: JSC Research Center of Construction

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

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

Главный редактор
ЗВЕЗДОВ Андрей Иванович, д-р техн. наук, профессор
Научный редактор
СМИРНОВА Любовь Николаевна, канд. техн. наук

БАЖЕНОВ Валентин Георгиевич, академик АИН,
д-р физ.-мат. наук, профессор
НИИМ ННГУ им. Лобачевского,
Нижний Новгород, Российская Федерация

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

ВОЛКОВ Андрей Анатольевич,
д-р техн. наук, профессор
АО «НИЦ «Строительство»,
Москва, Российская Федерация

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

ДАВИДЮК Алексей Николаевич, д-р техн. наук
Москва, Российская Федерация

ЕРЕМЕЕВ Павел Георгиевич, д-р техн. наук, профессор
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»,
Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ПЯТИКРЕСТОВСКИЙ Константин Пантелеевич,
д-р техн. наук, профессор
ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»,
Москва, Российская Федерация

СТАВНИЦЕР Леонид Рувимович,
д-р техн. наук, профессор
НИИОСП им. Н.М. Герсевича
АО «НИЦ «Строительство»,
Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

Вестник НИЦ «Строительство»
Научный потенциал строительной отрасли: сборник статей молодых ученых АО «НИЦ «Строительство»
Вып. 1 [32] / под ред. А.И. Звездова. – М.:
АО «НИЦ «Строительство», 2022. – 176 с.
ISSN 2224-9494 [Print] ISSN 2782-3938 [Online]
DOI журнала: <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI выпуска: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32))
В действующем Перечне ВАК от 01.02.2022 г. под номером 494.

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 молодых исследователей, посвященные актуальным проблемам современной строительной науки. Для научных работников, инженеров-проектировщиков, преподавателей, аспирантов.

ISSN 2224-9494 [Print]
ISSN 2782-3938 [Online]
© АО «НИЦ «Строительство»,
«Вестник НИЦ «Строительство», 2022

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

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

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

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

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

YEREMEYEV Pavel G., Dr. Sci. (Engineering), Professor
Research Institute of Building Constructions (TSNIISK)
named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center
of Construction, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

NEMCHINOV Yury I., Academician 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 (TSNIISK)
named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center
of Construction, Moscow, Russian Federation

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

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

STAVNITSER Leonid R., Dr. Sci. (Engineering), Professor
Research Institute of Bases and Underground Structures
(NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research
Center of Construction, Moscow, Russian Federation

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

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

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

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

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

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

Bulletin of Science and Research Center of Construction
The scientific potential of the construction industry:
a collection of articles by young scientists
JSC Research Center of Construction
Issue 1(32) / edited by A.I. Zvezdov. – M.:
JSC Research Center of Construction, 2022. – 176 p.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI journal <https://doi.org/10.37538/2224-9494>
DOI issue [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32))
In the current version of List of HAC from
February 1, 2022 our journal has a number 494.

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.
Contains articles by young researchers on topical issues
of modern building science.
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, 2022

Содержание

Научный потенциал строительной отрасли

Алексеев А.Г., Звездов А.А., Охупкин Д.В., Бегич Я.Э.

Эффективность применения экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС при зимнем бетонировании методом термоса 7

Бучкин А.В., Кудряков К.Л., Епихин С.Д.

Исследование прочности штифтового соединения Leimet ABB+ 350 для сборных железобетонных свай 21

Гизятуллин И.Р.

Сейсмостойкость зданий из каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей: обзор и анализ современного состояния вопроса 30

Салимуллин А.Р., Смирнов П.Н.

Разработка и исследование узловых соединений древесины перекрестноклееной на винтах, в том числе для многоэтажных зданий 53

Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Кудряков К.Л., Моисеева Н.А.

Оценка влияния агрессивной среды на долговечность штифтового соединения Leimet ABB+ 400 для составных железобетонных свай 65

Фаликман В.Р., Сорокин В.Ю.

Пути расширения сырьевой базы и снижения материалоемкости производства реактивных порошковых бетонов 82

Чернятин Д.В.

Учет влияния опасного криогенного процесса курумообразования при проектировании сооружений на примере опор ВЛ для ГК «Удоканская медь» 95

Климов А.С., Терехова И.И., Климова О.Л., Чумакова Е.В.

Метод стабилизации грунтового основания терморегулируемой пространственной железобетонной фундаментной платформы на вечномерзлом грунте 103

Логонова С.А., Гоглев И.Н.

К вопросу о повышении биостойкости бетонных и железобетонных мостовых опор 115

Мозголов М.В., Козлова Е.В.

К вопросу создания верификационной модели для расчета кессонного железобетонного перекрытия в вычислительном комплексе SCAD 128

Мухаметзянов З.Р., Урманшина Н.Э., Фаюршин Р.А.

Разработка метода капитального ремонта магистральных трубопроводов с применением композитных материалов 141

Никитин В.И.

У истоков научного знания. Древневосточные знания и их влияние на будущее науки 154

Полещук С.А., Горункова В.В., Лактионов В.С.

Использование параметров естественного охлаждения грунтов для стабилизации их в вечномерзлом состоянии 163

Contents

Scientific potential of the construction industry

Alekseev A.G., Zvezdov A.A., Okhapkin D.V., Begich Y.E.

Application efficiency of the PENOPLEX extruded polystyrene foam during winter concreting by the warm curing method 7

Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Epihin S.D.

Strength study of the Leimet ABB+ 350 pile joint for precast reinforced concrete piles 21

Giziatullin I.R.

Seismic resistance of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel construction: review and analysis of current status 30

Salimullin A.R., Smirnov P.N.

Development and research of screwed cross-laminated timber nodal joints for multi-storey buildings 53

Stepanova V.F., Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Moiseeva N.A.

Evaluation of the corrosive effect on the durability of the Leimet Abb+ 400 pile joint for precast reinforced concrete piles 65

Falikman V.R., Sorokin V.Yu.

Ways to expand the raw material base and reduce material consumption in the production of reactive powder concretes 82

Chernyatin D.V.

Accounting for the impact of hazardous frost action involving stone run formation in the design of structures on the example of overhead line towers for Udokan Copper 95

Klimov A.S., Terehova I.I., Klimova O.L., Chumakova E.V.

Method for soil base stabilization using the thermally controlled spatial reinforced concrete foundation platform in the permafrost soil 103

Loginova S.A., Goglev I.N.

Improving the biostability of concrete and reinforced concrete bridge supports 115

Mozgolov M.V., Kozlova E.V.

Creation of a SCAD verification model for the design calculations of a reinforced-concrete waffle slab floor system 128

Mukhametzhanov Z.R., Urmanshina N.E., Fayurshin R.A.

A method for overhaul repairs of trunk pipelines using composite piping 141

Nikitin V.I.

Origins of scientific knowledge. Ancient oriental studies and their impact on the future of science 154

Poleshchuk S.A., Gorunkova V.V., Laktionov V.S.

Use of natural cooling parameters for stabilizing soils in the permafrost state 163

УДК 693.547.34

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-7-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-7-20)

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ЭКСТРУЗИОННОГО ПЕНОПОЛИСТИРОЛА ПЕНОПЛЭКС ПРИ ЗИМНЕМ БЕТОНИРОВАНИИ МЕТОДОМ ТЕРМОСА

А.Г. АЛЕКСЕЕВ^{1,2}, канд. техн. наук

А.А. ЗВЕЗДОВ¹

Д.В. ОХАПКИН^{1,2,✉}

Я.Э. БЕГИЧ^{3,4}

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

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

³ООО «ПЕНОПЛЭКС СПб», Саперный пер., д. 1, литер «А», г. Санкт-Петербург, 191014, Российская Федерация

⁴Инженерно-строительный институт ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», ул. Политехническая, д. 29, г. Санкт-Петербург, 195251, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В статье представлены результаты исследовательской работы по изучению возможности применения экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС в опалубочных системах при зимнем бетонировании методом термоса.

Цель. Исследование производилось с целью разработки опалубочной системы с применением экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС для сокращения сроков твердения бетона до необходимой прочности и снижения затрат электроэнергии при комбинировании метода термоса с электропрогревом при зимнем бетонировании.

Материалы и методы. Для решения поставленной цели выполнен анализ действующих нормативной и методической баз, затрагивающих вопрос исследования. Разработана специальная программа экспериментальных исследований и проведены испытания по определению прочности полученных образцов бетона, выполненных по различным схемам теплоизоляции опалубочной системы без использования электропрогрева бетона и с использованием электропрогрева бетона с фиксацией энергопотребления. Выполненные работы позволяют делать выводы об эффективности применения экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС в универсальных опалубочных системах для зимнего бетонирования методом термоса.

Результаты. Выявлено, что наибольшую эффективность при зимнем бетонировании методом термоса в сравнении с разработанными схемами имеет сплошная теплоизоляция из экструзионного пенополистирола. При использовании электропрогрева схема со сплошным утеплением в зависимости от времени выдержки бетона дает экономию энергоресурсов в 3,5–5,5 раза выше, в отличие от схемы без использования экструзионного пенополистирола в качестве теплоизоляции. Испытания по определению прочности бетона показали, что уже на вторые сутки удается получить прочность бетона на сжатие требуемой для снятия опалубки.

Выводы. По результатам исследования установлено, что использование плит из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС в опалубочной системе со сплошной теплоизоляцией при бетонировании в зимних

условиях методом термоса позволяет сократить сроки твердения бетона до необходимой прочности, а также снизить энергозатраты на электропрогрев при комбинировании методов зимнего бетонирования.

Ключевые слова: зимнее бетонирование, метод термоса, экструзионный пенополистирол, ПЕНОПЛЭКС, бетон, железобетон

Для цитирования: Алексеев А.Г., Звездов А.А., Охапкин Д.В., Бегич Я.Э. Эффективность применения экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС при зимнем бетонировании методом термоса // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 7–20. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-7-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-7-20)

Вклад авторов

Алексеев А.Г. – общее руководство, редакция.

Звездов А.А. – ответственный исполнитель, постановка цели и задач исследования.

Охапкин Д.В. – проведение экспериментальных исследований.

Бегич Я.Э. – представитель заказчика, участие при проведении экспериментального исследования.

Финансирование

Исследование выполнено по заказу ООО «ПЕНОПЛЭКС СПб».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

APPLICATION EFFICIENCY OF THE PENOPLEX EXTRUDED POLYSTYRENE FOAM DURING WINTER CONCRETING BY THE WARM CURING METHOD

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

A.A. ZVEZDOV¹

D.V. OKHAPKIN^{1,2✉}

Y.E. BEGICH³

¹ Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Ryazan Ave., 59, Moscow, 109428, Russian Federation

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

³ LLC PENOPLEX SPb, Saperny per., 1A, Saint-Petersburg, 191014, Russian Federation

⁴ Peter the Great St.Petersburg Polytechnic University (SPbPU), Polytechnicheskaya str., 29, 195251, Saint-Petersburg, Russian Federation

Abstract

Introduction. The article presents the results of research into the possibility of using PENOPLEX extruded polystyrene foam in formwork systems during winter concreting by the warm curing method.

Aim. The study is aimed at the development of the formwork system applying the PENOPLEX extruded polystyrene foam for shortening the periods of concrete hardening to the necessary strength and reducing the electric power costs during the combination of the warm curing with electrical heating in the winter concreting.

Methods and materials. The analysis of the acting regulatory and methodical bases, concerning the studied issue, was carried out for solving the stated goals. A special program of experimental studies was developed and tests were carried out to determine the strength of the obtained samples of concrete made according to various schemes of thermal insulating the formwork system both with and without using the concrete

electric heating under fixed energy consumption. The performed works promote for the conclusions about the effectiveness of the extruded polystyrene application in the universal formwork systems during the winter concreting by the warm curing method.

Results. In the comparison with the developed schemes, the continuous thermal insulation of the extruded polystyrene foam was revealed to have the greatest effectiveness during the winter concreting by the warm curing method. Depending on the concrete holding time, the continuous thermal insulation scheme under electric heating saves energy resources 3.5–5.5 times efficiently in contrast to the scheme without using the extruded polystyrene foam in terms of the insulation. Concrete strength tests demonstrated that the concrete compressive strength required for removing the formwork can be obtained on the second day already.

Conclusions. According to the results of the study, the use of the PENOPLEX extruded polystyrene foam plates in the formwork system with the continuous heat insulation during the winter concreting by the warm curing method reduces the periods of concrete hardening to the necessary strength and decreases power consumption for the electrical heating in the combination of winter concreting methods.

Keywords: winter concreting, warm curing, extruded polystyrene foam, PENOPLEX, concrete, reinforced concrete

For citation: Alekseev A.G., Zvezdov A.A., Okhapkin D.V., Begich Y.E. Application efficiency of the PENOPLEX extruded polystyrene foam during winter concreting by the warm curing method. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 7–20 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-7-20](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-7-20)

Author contribution statements

Alekseev A.G. – general management, editing.

Zvezdov A.A. – responsible executor, setting the goals and objectives of the study.

Okhapkin D.V. – conducting experimental research.

Begich Y.E. – customer representative, participation in the experimental research.

Funding

The study was performed by the order of the “PENOPLEX SPb” LLC.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Непрерывное увеличение объема монолитного строительства в особенности на Севере и Дальнем Востоке России, где зимний период длится более 6 месяцев, а температура наружного воздуха снижается до -60 °C и ниже, вызывает необходимость обеспечения надлежащих условий для твердения бетона.

За последнее время количество новой информации, затрагивающей вопросы зимнего бетонирования, существенно уменьшилось. Качественное развитие опалубочных систем, теплоизоляционных материалов, способов формирования бетонной смеси и ее состава, а также приборов для измерения температуры, позволяют расширить имеющийся опыт в технологии зимнего бетонирования [1].

Одним из экономичных способов зимнего бетонирования является метод термоса. Метод термоса основан на использовании экзотермического тепла, выделяемого цементом в процессе твердения бетона [2–5].

В настоящее время при многообразии методов тепловой обработки перед производителем работ стоит вопрос рациональности применения одного из методов или их сочетания, например метод термоса с электропрогревом [6–8].

В рамках представленной работы рассматривается возможность применения материала ПЕНОПЛЭКС в опалубочных системах при зимнем бетонировании в различных условиях производства работ при отрицательной температуре для сохранения тепла в конструкции в период прогрева.

Цель

Целью настоящей работы являлось определение эффективности и целесообразности применения метода термоса с использованием экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС при зимнем бетонировании. Также исследование проводилось с целью разработки опалубочной системы с применением материала ПЕНОПЛЭКС, задача которой заключается в сокращении сроков твердения бетона и экономии электроэнергии при комбинировании метода термоса с электропрогревом в условиях зимнего бетонирования.

Материалы и методы

Для проведения исследований разработан стенд на основе универсальной опалубочной системы для бетонирования колонн, сечением 400×400 мм и стационарной морозильной камеры с возможностью поддерживать низкую отрицательную температуру воздуха до -20 °C с точностью $\pm 0,5$ °C.

Кроме стационарного термометра морозильная камера дополнительно оснащалась «термокосами» – системой высокоточных температурных датчиков, подключенных к компьютеру, с возможностью опроса данных с частотой 1 секунда. На каждую колонну приходилось по две термокосы, располагаемые по центру и ближе к углу колонны (см. рис. 1), каждая из которых оснащалась четырьмя датчиками. Подключенные к компьютеру, датчики позволяли в режиме реального времени следить и анализировать температуру формирования и твердения бетонной смеси.

Лабораторные исследования разделены на 2 этапа.

Этап 1

Для испытаний принят класс бетона В25, а также морозостойкая добавка Sika Antifreeze FS-1, состав бетона представлен в табл. 1.

Для этапа 1 принято два типа универсальных опалубочных систем (рис. 1):

- 1) со сплошной изоляцией из экструзионного пенополистирола, теплоизоляция крепились с внутренней стороны опалубки, также изолировалось дно и формировалась крышка (СО);
- 2) без теплоизоляции (БО).

Бетонирование колонн выполнялось ручным способом с формированием бетонной смеси в электрическом бетоносмесителе. Бетонирование колонн проводилось послойно с применением глубинного вибратора. По завершении формирования бетонной смеси фиксировались дата, время и исходная температура смеси, и опалубка закрывалась крышкой, через которую пропускались концы термокос для обеспечения минимальных теплопотерь.

Для этапа 1 выполнено бетонирование 4 колонн по 2 колонны каждого типа. Первые две колонны каждого типа выдерживались трое суток для последующего вскрытия опалубки и отбора образцов для определения прочности бетона. Вторая пара колонн вскрывалась на седьмые сутки для отбора образцов, далее колонны перемещали на стационарное хранение при той же температуре, что и при испытаниях и хранились до истечения 28 суток, после

Таблица 1

Состав бетона В25

Table 1

B25 concrete composition

Класс	Водоцементное соотношение (В/Ц)	Расход компонентов на приготовление 1м ³ раствора				Добавка морозостойкая, кг
		вода, л	песок, кг	щебень, кг	цемент, кг	
B25	1,94	175	651	1250	340	6,8

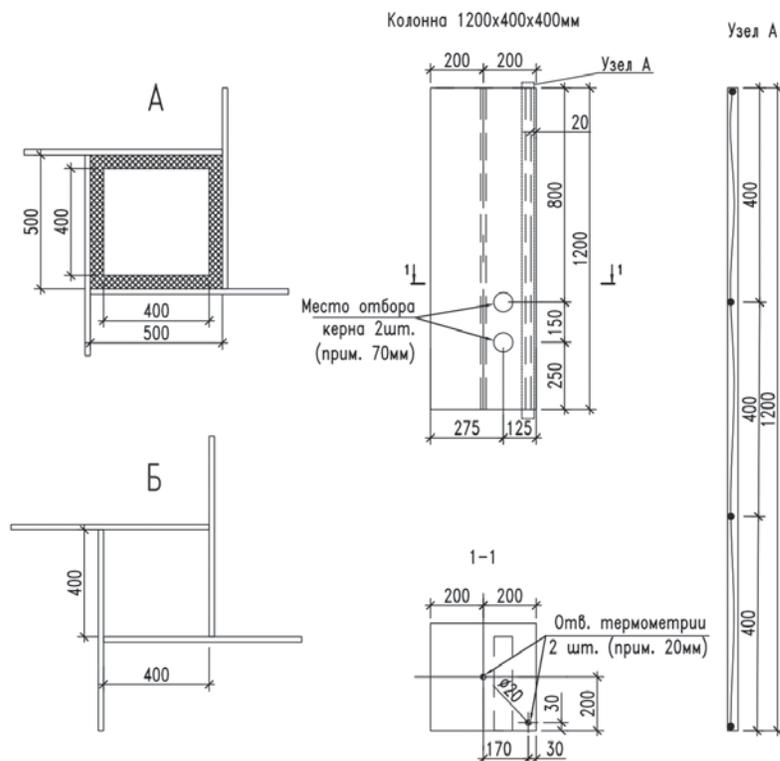


Рис. 1. Модель колонны с опалубочной системой на этапе 1:

А – схема колонны в опалубочной системе при сплошной изоляции (утеплитель крепится с внутренней стороны опалубочной системы); Б – схема колонны в опалубочной системе без изоляции

Fig. 1. Model of the column with the formwork system in the stage 1: А – scheme of the column in the formwork system with continuous insulation (the insulation is attached inside of the formwork system); Б – scheme of the column in the formwork system without insulation

чего из колонн повторно отбирались образцы для контрольного определения прочности и получения прочности R_{28} .

По завершении необходимой выдержки бетонной смеси производилось вскрытие и снятие опалубки для последующего отбора образцов бетона (рис. 2).

Образцы для определения прочности бетона отбирались из колонн электрическим сверлильным пробоборником.



Рис. 2. Общий вид колонны без экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС на этапе 1
Fig. 2. General view of the column without the PENOPLEX extruded polystyrene foam in the stage 1

гопотребления и армированием, а также, в соответствии с Руководством по прогреву бетона в монолитных конструкциях [9], температурный режим твердения бетона во время проведения всех экспериментов выбран и поддерживался в диапазоне $+35-65$ °С. Армирование необходимо для обеспечения прогрева бетонной смеси. Температура окружающего воздуха во время испытаний -20 °С.

Для этапа 2 принято два типа универсальных опалубочных систем (рис. 3):

- со сплошной изоляцией из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС, теплоизоляция крепится с внутренней стороны опалубки, также изолируется дно и формируется крышка (СО);
- без теплоизоляции (БО).

Процесс подготовки системы электропрогрева осуществлялся следующим образом:

После непрерывной навивки провода (ПНСВ) с инвентарного барабана через расчетное количество петель (оборотов) делались выводы провода. Провод крепился к арматуре мягкой вязальной проволокой, чтобы сохранить электроизоляцию и несмещаемость. Перед установкой опалубки (бетонированием) провод проверялся мультиметром на отсутствие короткого замыкания.

Контроль за режимом электропрогрева бетона производился с помощью пирометров и датчиков температуры, устанавливаемых в бетонную смесь. Датчики температуры позволяли автоматически регулировать режим электропрогрева бетона.

До проведения испытаний по определению прочности бетона из конструкции керны хранились при отрицательной температуре, в соответствии с температурой окружающего воздуха, принятой при испытаниях (-5 и -20 °С) с целью исключить размораживание образцов и их последующий набор прочности.

Далее керны обрабатывались и распиливались на цилиндры. Грани цилиндров шлифовались с целью передачи равномерного сжимающего усилия без эксцентриситета. Температура образцов при определении прочности бетона поддерживалась в соответствии с температурой окружающего воздуха принятой при испытаниях (-5 и -20 °С).

Этап 2

Состав бетона аналогичен этапу 1 (см. табл. 1).

Этап 2 выполнялся с учетом дополнительных требований, а именно с дальнейшим определением прочности бетона возрастом 2, 3 и 5 суток. С прогревом, фиксацией энер-

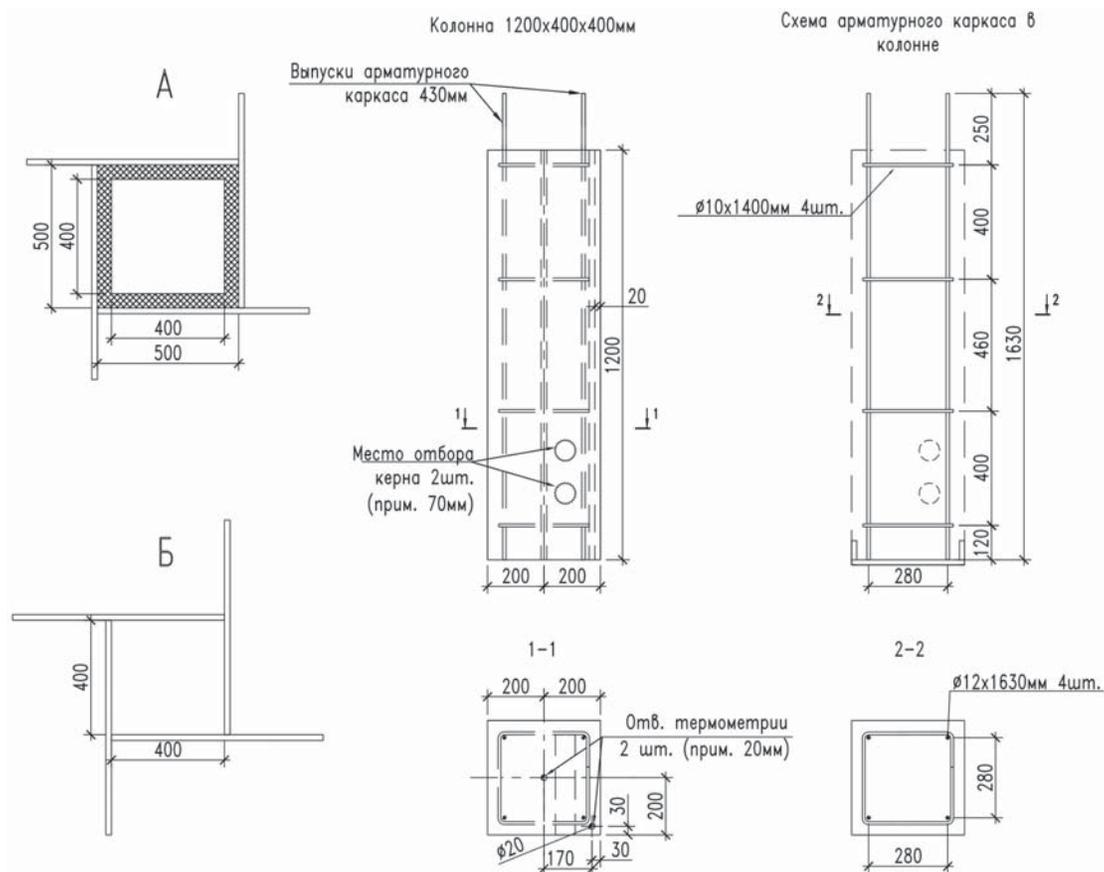


Рис. 3. Модель колонны с опалубочной системой на этапе 2:

А – схема колонны в опалубочной системе при сплошной изоляции (утеплитель крепится с внутренней стороны опалубочной системы), Б – схема колонны в опалубочной системе без изоляции

Fig. 3. Model of the column with the formwork system in the stage 2: A – scheme of the column in the formwork system with continuous insulation (the insulation is attached inside of the formwork system); Б – scheme of the column in the formwork system without insulation

В бетонную смесь между проводами монтировался пенал из тонкостенной трубки. Датчики температуры устанавливали в пенал и подключали к программному комплексу для фиксации температурного режима. Контроль за электропотреблением производился с помощью электрических ваттметров.

Бетонирование колонн на этапе 2 выполнялось аналогично этапу 1 – ручным способом.

Для этапа 2 выполнено бетонирование шести колонн по три колонны каждого типа. Первые две колонны, по одной каждого типа, выдерживались двое суток для последующего вскрытия опалубки и отбора образцов для определения прочности бетона. Вторая пара колонн вскрывалась на третьи сутки. Третья пара колонн вскрывалась на пятые сутки.

По завершении необходимой выдержки бетонной смеси производилось вскрытие и снятие опалубки для последующего отбора образцов (кернов).

До проведения испытаний по определению прочности бетона из конструкции керны, аналогично этапу 1, хранились при отрицательной температуре, в соответствии

с температурой окружающего воздуха, принятой при испытаниях ($-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) с целью исключить размораживание образцов и их последующий набор прочности. Далее, аналогично этапу 1, образцы распиливались на цилиндры и определялась их прочность при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Результаты

Результаты определения прочности бетона показали, что при использовании опалубочной системы со сплошным слоем теплоизоляции (СО) из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС, бетон набрал достаточную прочность на сжатие для снятия опалубки, в отличие от бетона с опалубочной системой без теплоизоляции (БО). В обоих случаях бетон в опалубочной системе без теплоизоляции (БО) замерз и показал критически низкую прочность на сжатие. Результаты определения прочности бетона на этапе 1 представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты испытаний на этапе 1

Table 2

Stage 1 test results

№ п/п	Выдержка, сутки	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Опалубочная система	Средняя прочность, МПа
1.1	3	-5	БО	-
1.2			СО	12,3
1.3		-20	БО	2,3
1.4			СО	15,4
1.5	7	-5	БО	-
1.6			СО	18,5
1.7		-20	БО	1,7
1.8			СО	15,5
1.9	28	-5	БО	10,9
1.10			СО	24,5
1.11		-20	БО	19,5
1.12			СО	25,8

После окончания лабораторных испытаний на этапе 1 производилась обработка и анализ данных термометрии, полученных при формировании и твердении бетонной смеси.

Результаты термометрии показывают, что использование в качестве материала теплоизоляции плит из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС в зимнем бетонировании методом термоса позволяют достичь температуры бетона до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ уже на вторые сутки при температуре окружающего воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, после чего отмечено плавное снижение температуры тела бетона до $+4\text{ }^{\circ}\text{C}$. При температуре окружающего воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ максимальная температура бетона, которой удалось достичь, составила $+38\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 1-е сутки, после чего отмечено снижение температуры до $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 3-и сутки и далее до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ на 7-е сутки (рис. 4).

При отсутствии плит из экструзионного пенополистирола максимальная отметка температуры тела бетона составляла $+17\text{ }^{\circ}\text{C}$ при температуре окружающего воздуха $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

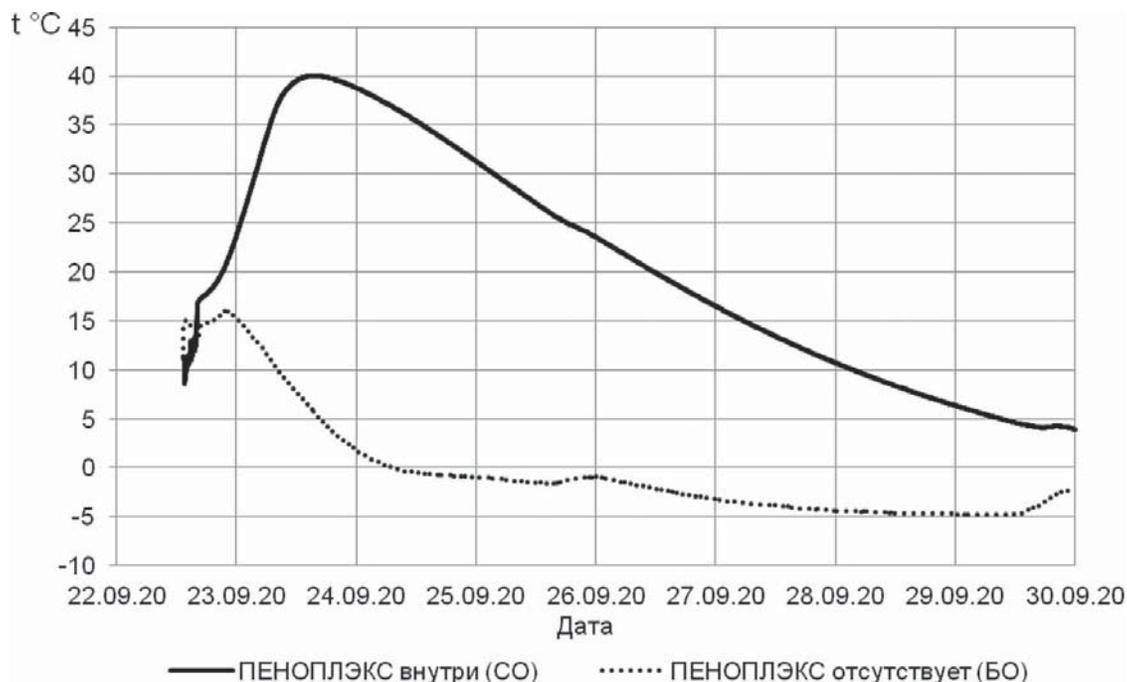


Рис. 4. Изменение средних значений температуры бетона семисуточной выдержки при температуре окружающего воздуха -5°C

Fig. 4. Variations in the average temperature of the 7-day concrete at the ambient air temperature of -5°C

При температуре окружающего воздуха -20°C максимальная температура бетона, которой удалось достичь, составила $+13^{\circ}\text{C}$. В обоих испытаниях при отсутствии теплоизоляции тело бетона замерзло (рис. 5).

Результаты определения прочности бетона на этапе 2 показали, что при использовании опалубочной системы со сплошным слоем теплоизоляции (СО) плитами из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС бетон набрал прочность на 2,1 и 1,1 МПа больше, в отличие от бетона с опалубочной системой без теплоизоляции (БО) при выдержке 2 и 3 суток соответственно. При этом следует отметить, что энергопотребление опалубки без теплоизоляции против опалубки со сплошной теплоизоляцией имеет энергопотребление выше в 3,5 раза на вторых сутках, при этом уже на пятые сутки выдержки бетона это соотношение превышает 5,5 раза. Эта разница увеличивается в зависимости от времени выдержки бетона. Результаты определения прочности бетона и энергопотребления на этапе 2 представлены в табл. 3.

После окончания лабораторных испытаний на этапе 2 производилась обработка и анализ данных термометрии, полученных при формировании и твердении бетонной смеси. Результаты термометрии показывают, что использование в качестве материала теплоизоляции из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС в зимнем бетонировании методом термоса с использованием электропрогрева позволяют достичь отметки температуры тела бетона в $+60^{\circ}\text{C}$ спустя 12 ч с начала бетонирования и ее поддержания при температуре окружающего воздуха.

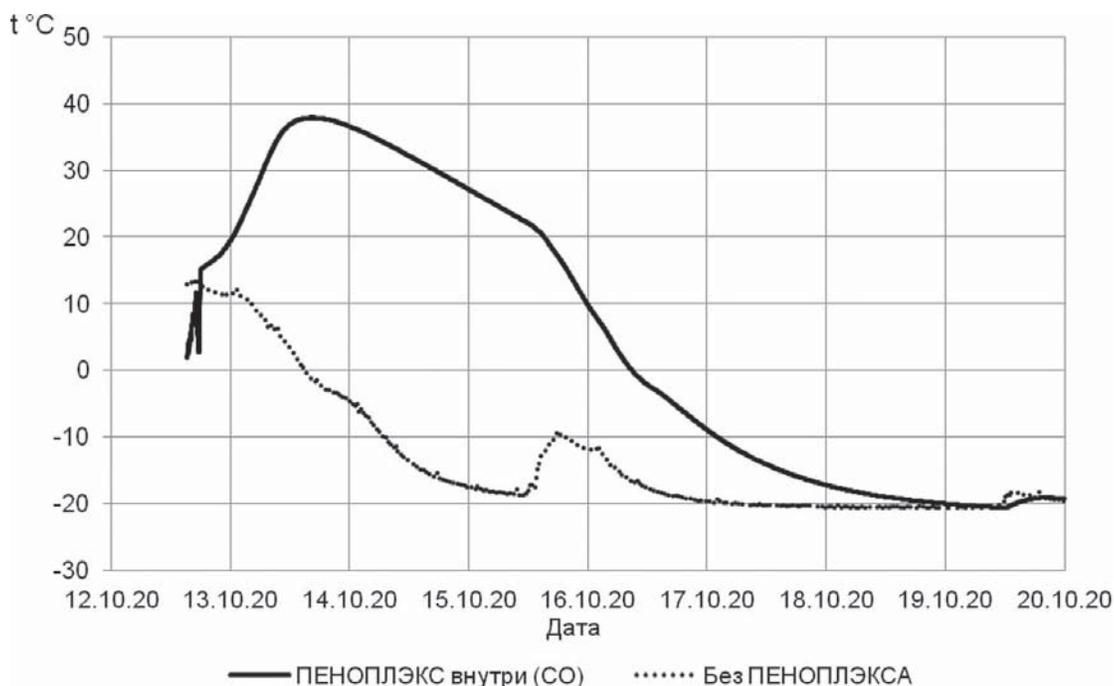


Рис. 5. Изменение средних значений температуры бетона семисуточной выдержки при температуре окружающего воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 5. Variations in the average temperature of the 7-day concrete at the ambient air temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 3

Результаты испытаний на этапе 2

Table 3

Stage 2 test results

№	Выдержка, сутки	Температура, $^{\circ}\text{C}$	Опалубочная система	Средняя прочность, МПа	Энергопотребление, кВт
2.1	2	-20	БО	21,3	22,97
2.2			СО	23,2	5,77
2.3	3		БО	21,7	36,23
2.4			СО	22,8	10,71
2.5	5		БО	18,8	79,27
2.6			СО	18,0	14,73

При отсутствии плит теплоизоляции из экструзионного пенополистирола с использованием электропрогрева максимальная положительная отметка температуры тела бетона составила $+41\text{ }^{\circ}\text{C}$. Результаты термометрии представлены на рис. 6–8.

Из рисунка 8 следует вывод, что при пятисуточной выдержке бетона в опалубочной системе без теплоизоляции (БО) химическая реакция твердения бетона завершается на 3-суточном интервале, мощности выбранной системы электропрогрева недостаточно для поддержания заявленного температурного режима твердения бетона ($+35\text{--}65\text{ }^{\circ}\text{C}$).

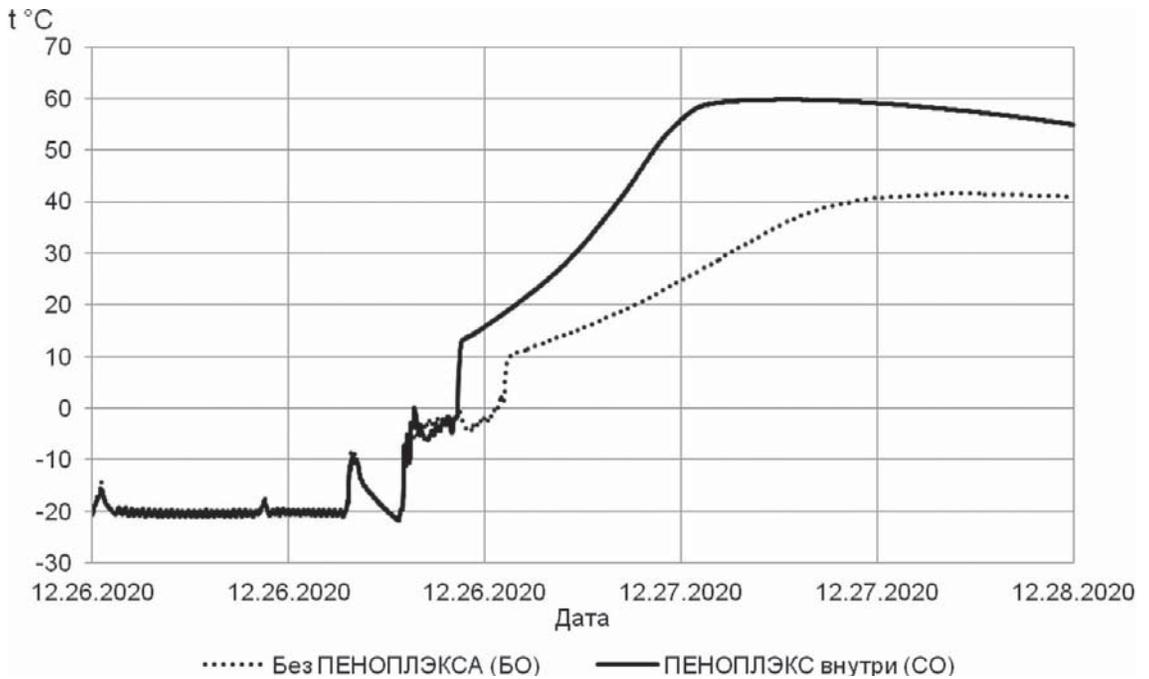


Рис. 6. Изменение средних значений температуры бетона 2-суточной выдержки при температуре окружающего воздуха -20°C

Fig. 6. Variations in the average temperature of the 2-day concrete at the ambient air temperature of -20°C

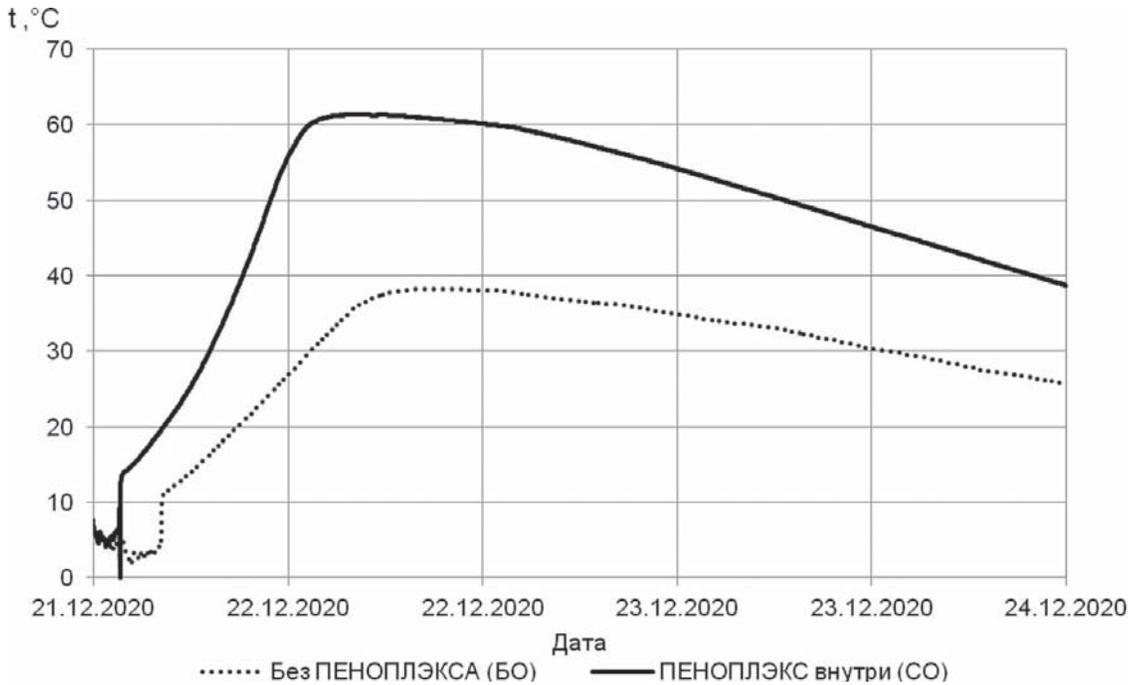


Рис. 7. Изменение средних значений температуры бетона 3-суточной выдержки при температуре окружающего воздуха -20°C

Fig. 7. Variations in the average temperature of the 3-day concrete at the ambient air temperature of -20°C

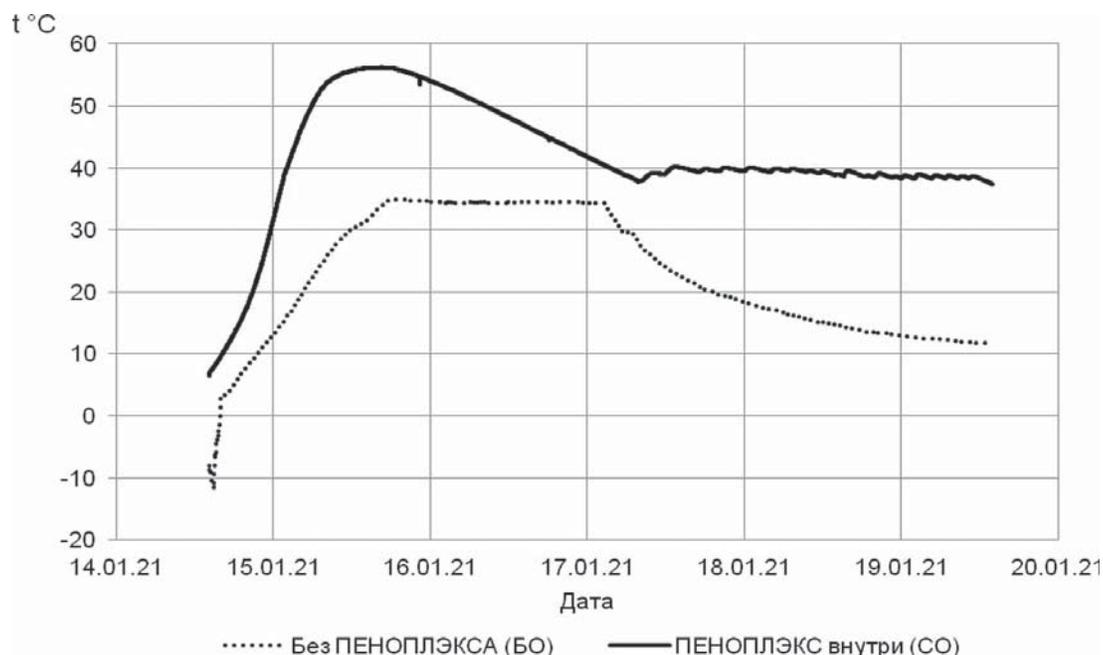


Рис. 8. Изменение средних значений температуры бетона 5-суточной выдержки при температуре окружающей воздуха $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Fig. 8. Variations in the average temperature of the 5-day concrete at the ambient air temperature of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Выводы

Установлено, что при бетонировании железобетонных конструкций в зимних условиях наибольшую эффективность имеет комбинированный метод, а именно метод термоса с применением сплошной теплоизоляции из экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС и электропрогрева.

Опалубочная система с применением сплошной теплоизоляции из экструзионного пенополистирола позволяет достичь оптимального температурного режима для твердения бетона в отличие от других типов опалубочных систем.

Прочность бетона на сжатие при использовании в опалубочной системе с теплоизоляцией экструзионного пенополистирола на вторые сутки твердения соответствует прочности бетона, требуемой для снятия опалубки.

При этом следует отметить, что энергопотребление опалубки без теплоизоляции против опалубки со сплошной теплоизоляцией имеет энергопотребление выше в 3,5 раза на вторых сутках, при этом уже на пятые сутки выдержки бетона это соотношение превышает 5,5 раза. Эта разница увеличивается в зависимости от времени выдержки бетона.

Применение энергоэффективных опалубочных систем для бетонирования особенно актуально на объектах, расположенных в районах с дефицитной электроэнергией (например, в районах Крайнего Севера). При прогреве железобетонных строительных конструкций в зимний период особое внимание важно уделять расчетам необходимой нагрузки на сеть и наличию требуемого количества трансформаторов с учетом возможного аварийного выхода из строя некоторых из них. За счет сохранения тепла в теле бетона увеличивается время на ремонт или замену источников электроэнергии для систем обогрева.

Применение данной технологии позволяет сократить сроки бетонных работ в зимних условиях, уменьшить общие экономические издержки на объекте в целом, а также снизить риски, связанные с перегревом или замерзанием бетонной смеси.

Результаты исследования могут быть использованы в качестве рекомендаций при выполнении работ по бетонированию в зимних условиях методом термоса.

При дальнейших исследованиях по данной теме предполагается полномасштабное проведение эксперимента с применением опытного образца опалубочной системы при отрицательной температуре на открытом воздухе, возможно в суровых климатических условиях с экстремально низкими температурами воздуха до -60°C .

Список литературы

1. Головнев С.Г. Зимнее бетонирование: этапы становления и развития / С.Г. Головнев // Вестник Волгогр. гос. архит.-строит. ун-та. Сер.: Стр.-во и архит. – 2013. – Вып. 31(50), Ч. 2. Строительные науки. – С. 529–534.
2. Миронов С.А. Теория и методы зимнего бетонирования / С.А. Миронов. – Москва: Стройиздат, 1975. – 700 с.
3. Руководство по производству бетонных работ в зимних условиях, районах Дальнего Востока, Сибири и Крайнего Севера / ЦНИИОМТП Госстроя СССР. – Москва: Стройиздат, 1982. – 213 с.
4. ТР 80-98. Технические рекомендации по технологии бетонирования безобогревным способом монолитных конструкций с применением термоса и ускоренного термоса. – Москва: Мосоргстрой, 1998. – 64 с.
5. Руководство по зимнему бетонированию с применением метода термоса. – Москва: Стройиздат, 1975. – 192 с.
6. Гныря А.И. Технология бетонных работ в зимних условиях: учеб. пособие / А.И. Гныря, С.В. Коробков. – Томск: Изд-во Том. гос. архит.-строит. ун-та, 2011. – 412 с.
7. Молодин В.В. Бетонирование монолитных строительных конструкций в зимних условиях: монография / В.В. Молодин, Ю.В. Лунев; науч. ред. Ю.А. Попов; Федеральное агентство по образованию Российской Федерации, Новосибирский гос. архитектурно-строит. ун-т. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2006. – 300 с.
8. Красновский Б.М. Инженерно-физические основы методов зимнего бетонирования: учеб. пособие для вузов / Б.М. Красновский. – 3-е изд., испр. и доп. – Москва: Издательство Юрайт, 2016. – Ч. 2. – 231 с. – (Серия: Университеты России).
9. Руководство по прогреву бетона в монолитных конструкциях / Российская акад. архитектуры и строительных наук (РААСН), науч.-исслед., проектно-конструкторский и технологический ин-т бетона и железобетона (НИИЖБ); [принимали участие: С.А. Амбарцумян и др.]; под ред. Б.А. Крылова, С.А. Амбарцумяна, А.И. Звездова. – Москва: б. и., 2005. – 275 с.

References

1. Golovnev S.G. Winter concreting: stages of formation and development. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura = Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering Series: Civil Engineering and Architecture. 2013;(31) Part 2:529–534 (in Russian).
2. Mironov S.A. Theory and methods of winter concreting. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1975 (in Russian).
3. TSNIOMTP Gosstroy of the USSR. Guidelines for the production of concrete works in winter conditions, areas of the Far East, Siberia and the Far North. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1982 (in Russian).
4. TR 80-98. Technical recommendations on the technology of concreting by a non-heating method of monolithic structures using a thermos and an accelerated thermos. Moscow: Mosorgstroy; 1998 (in Russian).
5. Guidelines for winter concreting using the thermos method. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1975 (in Russian).
6. Gnyrya A.I., Korobkov S.V. Technology of concrete works in winter conditions: studies. Manual. Tomsk: Publishing House of the Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering; 2011 (in Russian).

7. *Molodin V.V., Lunev Yu.V.* Concreting of monolithic building structures in winter conditions. Novosibirsk: Novosibirsk State University of Architecture and Construction; 2006 (in Russian).
8. *Krasnovsky B.M.* Engineering and physical foundations of winter concreting methods. Part 2. Moscow: Yurayt Publ.; 2016 (in Russian).
9. *Krylov B.A., Ambartsumyan S.A., Zvezdov A.I.,* editors. Guidelines for heating concrete in monolithic structures. Moscow; 2005 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Григорьевич Алексеев, канд. техн. наук, руководитель Центра геокриологических и геотехнических исследований НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство», доцент ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Минобрнауки России, Москва

e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

Andrey G. Alekseev, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Center for Geocryological and Geotechnical Research, NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Associate Professor of National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

e-mail: adr-alekseev@yandex.ru

Антон Андреевич Звездов, младший научный сотрудник Лаборатории № 8 Механики мерзлых грунтов и расчета оснований, Сектор полевых испытаний грунтов и мониторинга, Центр геокриологических и геотехнических исследований, НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: 89636885828@mail.ru

Anton A. Zvezdov, Junior Researcher, Laboratory No. 8 of Frozen Soil Mechanics and Base Calculation, Field Testing and Monitoring Sector, Center for Geocryological and Geotechnical Research, NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: 89636885828@mail.ru

Денис Вадимович Охупкин[✉], студент 6-го курса кафедры «Строительство объектов тепловой и атомной энергетики», ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Минобрнауки России; техник Лаборатории № 8 Механики мерзлых грунтов и расчета оснований, Сектор полевых испытаний грунтов и мониторинга, Центр геокриологических и геотехнических исследований, НИИОСП им. Н.М. Герсеева АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: gemiotik@yandex.ru

Denis V. Okhapkin[✉], 6th year student of the Thermal and Nuclear Power Construction Department, National Research Moscow State University of Civil Engineering; technician of the Laboratory No. 8 of Frozen Soil Mechanics and Base Calculation, Field Testing and Monitoring Sector, Center for Geocryological and Geotechnical Research, NIIOSP named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: gemiotik@yandex.ru

Ясмин Эдинович Бегич, аспирант Высшей школы промышленно-гражданского и дорожного строительства, Инженерно-строительный институт ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», заместитель начальника технического отдела ООО «ПЕНОПЛЭКС СПб», Санкт-Петербург

e-mail: yasmin1010@yandex.ru

Yasmin E. Begich, Postgraduate student of the Higher School of Industrial, Civil and Road Construction, Institute of Civil Engineering, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, Deputy Head of the Technical Department LLC PENOPLEX SPb, St. Petersburg

e-mail: yasmin1010@yandex.ru

[✉]Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.078

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-21-29](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-21-29)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЧНОСТИ ШТИФТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ LEIMET ABB+ 350 ДЛЯ СБОРНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ

А.В. БУЧКИН¹, канд. техн. наукК.Л. КУДЯКОВ^{1,2}, канд. техн. наукС.Д. ЕПИХИН¹✉

¹Научно-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

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

Введение. Использование технологии стыкования секций сборных железобетонных свай с применением штифтовых соединений Leimet ABB+ 350 набирает популярность. Основными преимуществами данного стыка являются: низкая трудоемкость (относительно широко применяемых сварных соединений) при соединении элементов сваи между собой, высокая скорость монтажа, отсутствие необходимости в сварочных работах, бетонирования и пр. Широкое применение данного соединения в настоящее время ограничено недостаточной изученностью его параметров и, в частности, прочностных характеристик.

Целью исследования являлась экспериментальная проверка показателей прочности штифтового соединения Leimet ABB+ 350 при сжатии, растяжении, поперечном сдвиге и изгибе.

Материалы и методы. Исследования выполнены на сериях образцов, представляющих собой два фрагмента секций составных железобетонных свай по типовой серии 1.011.1-10, соединенных при помощи четырехзамкового штифтового соединения Leimet ABB+ 350. Испытания нагружением образцов выполнены по ГОСТ 8829-2018.

Результаты. Получены количественные и качественные параметры разрушения опытных образцов.

Выводы. Сделан вывод о равнопрочности штифтового соединения Leimet ABB+ 350 бетонному телу сваи при рассматриваемых воздействиях. Полученные результаты, характеризующие прочность штифтового соединения свай, могут быть использованы при разработке проектных решений и решении практических инженерных задач.

Ключевые слова: штифтовое соединение Leimet ABB+, стыки сборных железобетонных свай, испытания прочности конструкций

Для цитирования: Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Епихин С.Д. Исследование прочности штифтового соединения Leimet ABB+ 350 для сборных железобетонных свай // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 21–29. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-21-29](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-21-29)

Вклад авторов

Бучкин А.В. – общее руководство работой, редактирование чернового варианта статьи.

Кудяков К.Л. – разработка и реализация программы испытаний, обработка и анализ результатов, подготовка чернового варианта статьи.

Епихин С.Д. – реализация программы испытаний, обработка и анализ результатов, подготовка чернового варианта статьи.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ АО «НИЦ «Строительство».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

STRENGTH STUDY OF THE LEIMET ABB+ 350 PILE JOINT FOR PRECAST REINFORCED CONCRETE PILES

A.V. BUCHKIN¹, Cand. Sci. (Engineering)
K.L. KUDYAKOV^{1,2}, Cand. Sci. (Engineering)
S.D. EPIHIN¹✉

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

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

Abstract

Introduction. At present, the connection of precast concrete pile sections using Leimet ABB+ 350 pile joints becomes very popular. The main advantages of this joint include low labor intensity (relative to the widely used welded joints) for connecting pile elements, high installation speed, as well as the absence of welding works, concreting, etc. The wide application of this joint is currently limited by the insufficient study of its parameters and, in particular, strength characteristics.

Aim. Experimental testing of the strength indices of the Leimet ABB+ 350 pile joint under the compression, tension, transverse shear, and bending.

Methods and materials. The studies were performed on the series of samples represented by two fragments of the 1.011.1-10 standard precast reinforced pile sections connected by the Leimet ABB+ 350 four-lock pin joint. Loading tests of the samples were carried out in accordance with the GOST 8829-2018.

Results. The quantitative and qualitative destruction parameters of the samples are obtained.

Conclusions. The Leimet ABB+ 350 pile joint was concluded to be of the uniform strength to the pile concrete bodies under considered impacts. The obtained results on the strength of the pile pin joint can be used in the design development and the solution of practical engineering problems.

Keywords: Leimet ABB+ pin connection, precast reinforced concrete pile joints, structural strength tests

For citation: Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Epihin S.D. Strength study of the Leimet ABB+ 350 pile joint for precast reinforced concrete piles. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 21–29 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-21-29](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-21-29)

Author contribution statements

Buchkin A.V. – general management of the study, article draft editing.

Kudyakov K.L. – development and implementation of the test program, processing and analysis of the results, article draft preparation.

Epihin S.D. – implementation of the test program, processing and analysis of the results, article draft preparation.

Funding

The study was carried out within the framework of contractual works of JSC Research Center of Construction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

На сегодняшний день в строительной индустрии нашли свое применение различные технологии соединений секций сборных железобетонных свай, к которым можно отнести следующие [1–3]: сварной стык, стык стаканного типа, болтовой стык, замковое соединение, цанговое соединение, клеевой стык, штифтовое соединение и пр.

В настоящее время набирает популярность использование технологии штифтовых соединений секций сборных железобетонных свай [1–4]. Основными преимуществами данного стыка являются: низкая трудоемкость (относительно широко применяемых сварных соединений) при соединении элементов сваи между собой, высокая скорость монтажа, отсутствие необходимости в сварочных работах, бетонирования и пр. Штифтовые соединения свай использованы на строительных объектах в ряде европейских стран, например в Германии, Норвегии, Швеции, Дании. В России данная технология нашла свое применение на таких строительных объектах, как Музейный комплекс в г. Калининграде и комплекс «Лазурный» в г. Воронеже.

Штифтовое соединение Leimet ABB+ представляет собой металлический оголовок со встроенными анкерными выпусками и замковыми элементами (фиксирующими штырями и гнездами) для заведения заклинивающих забивных штифтов, которое осуществляется непосредственно при стыковании двух секций сборных железобетонных свай на строительной площадке. Принципиальная конструкция штифтового соединения Leimet ABB+ приведена на рис. 1 [4].

Широкое применение данного соединения в настоящее время ограничено недостаточной изученностью его параметров и, в частности, прочностных характеристик.

Цель

В испытательном центре АО «НИЦ «Строительство» выполнены исследования, целью которых являлась экспериментальная оценка несущей способности штифтовых соединений типа Leimet ABB+ 350. Исследования проводились в соответствии с разработанной программой испытаний, в рамках которой рассмотрены следующие виды нагружений (по 3 образца на каждый вид нагрузки):

- сжатие (серия СШС-1: образцы СШС-1.1, СШС-1.2, СШС-1.3);
- растяжение (серия СШС-2: образцы СШС-2.1, СШС-2.2, СШС-2.3);
- поперечный сдвиг (серия СШС-3: образцы СШС-3.1, СШС-3.2, СШС-3.3);
- изгиб (серия СШС-4: образцы СШС-4.1, СШС-4.2, СШС-4.3).

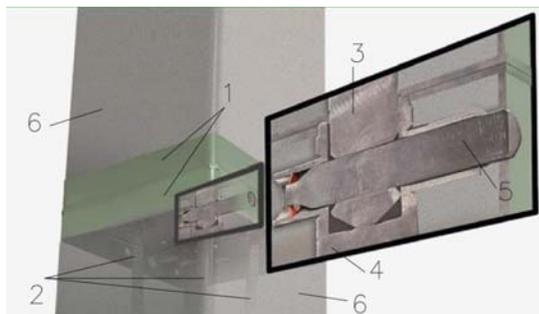


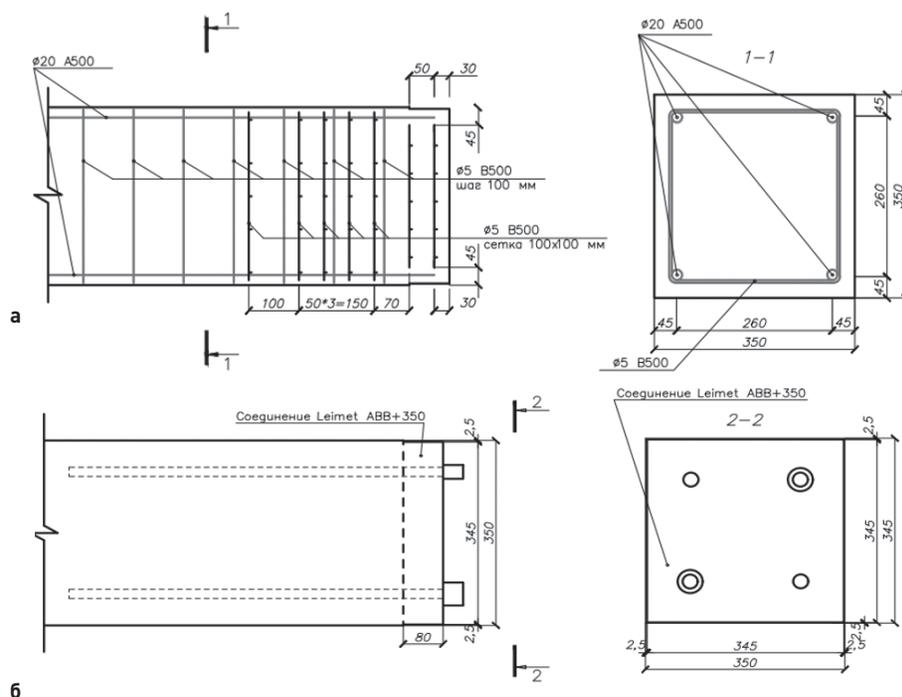
Рис. 1. Принципиальная конструкция штифтового соединения Leimet ABB+ [4]: 1 – металлический оголовок, представляющий собой торцевую пластину и обечайку по ее контуру; 2 – анкерные выпуски; 3 и 4 – элементы замка: фиксирующий штырь и гнездо соответственно; 5 – забивной штифт; 6 – секции сборных железобетонных свай

Fig. 1. Conceptual design of the Leimet ABB+ pile joint [4]: 1 – metallic cap consisting of end frame and the shell along its contour; 2 – anchor bars; 3, 4 – locking elements: locking dowel and locking block, respectively; 5 – locking pin; 6 – reinforced concrete pile sections

Материалы и методы

Каждый опытный образец стыка свай представляет собой два фрагмента секций составных железобетонных свай, соединенных при помощи четырехзамкового штифтового соединения Leimet ABB+ по ТУ 25.11.23-001-92894761-2018 «Соединение штифтовое для свай. Технические условия» [5]. Для одной серии образцов верхние и нижние фрагменты секций свай имели идентичные параметры. Образцы выполнены по типовой серии 1.011.1-10 (выпуск 8) [1]: из бетона класса В25 по прочности на сжатие; с продольной арматурой класса А500С диаметром 20 мм; поперечной арматуры в виде хомутов из проволоки класса В500 диаметром 5 мм с шагом 100 мм; защитный слой продольной арматуры 35 мм. Все образцы выполнены с поперечным сечением 350 × 350 мм (рис. 2). Опытные образцы серии СШС-1, СШС-2, СШС-3 имели длину (в собранном виде) 1600 мм, а в серии СШС-4 – 4000 мм. Для передачи растягивающей нагрузки на торцах образцов серии СШС-2 устроены специальные закладные детали, представляющие собой приваренные к продольной арматуре образцов металлические пластины с выпуском для фиксации в зажимах испытательной машины.

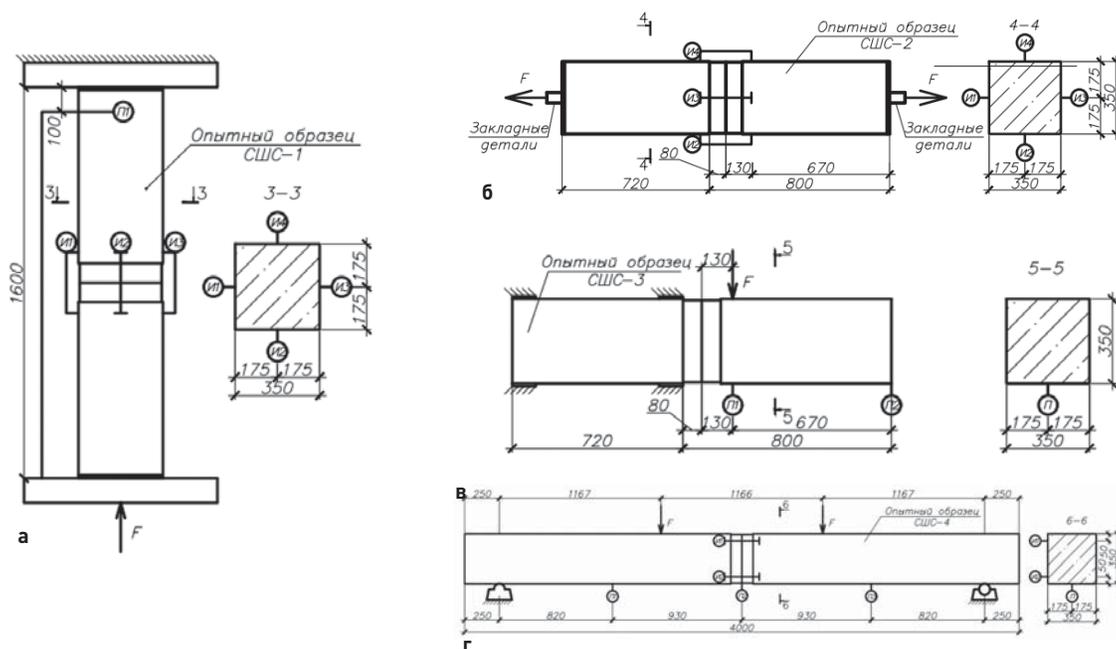
Испытания проводились по ГОСТ 8829-2018 [6] с применением специализированного оборудования. При испытаниях оценивались нагрузка, при которой происходило разрушение опытных образцов, и характер их разрушения. Принципиальные схемы испытаний серий образцов представлены на рис. 3.



*размеры указаны в мм

Рис. 2. Принципиальная конструкция опытных образцов: а – схема армирования; б – схема установки штифтового соединения Leimet ABB+ 350

Fig. 2. Conceptual design of tested samples: а – reinforcement scheme; б – Leimet ABB+ 350 pile joint installation scheme



*размеры указаны в мм

Рис. 3. Принципиальные схемы испытаний образцов свай со штифтовым соединением Leimet ABB+ 350 при определении прочности: а – на сжатие; б – на растяжение; в – на поперечный сдвиг; г – на изгиб
Fig. 3. Conceptual schemes for strength testing of pile samples with Leimet ABB+ 350 pile joints: а – compression; б – tension; в – transverse shear; г – bending

Результаты

В результате испытаний все образцы серий 1, 3 и 4 доведены до разрушения, при этом оно происходило по бетонному телу сваи. В образцах серии 2 непосредственное разрушение опытных образцов не было достигнуто – отказ происходил в результате недостаточной несущей способности специальных торцевых закладных деталей, устроенных для передачи растягивающей нагрузки. При этом для образцов СШС-2.2 и СШС-2.3 выполнено усиление данных закладных деталей при помощи устройства косынок.

Для всех образцов визуальных признаков повреждения металлических элементов штифтового соединения Leimet ABB+ 350 не установлено. Характерные схемы разрушения серий образцов приведены на рис. 4–7. Основные результаты испытаний приведены в табл. 1.

Выводы

При испытаниях на сжатие, поперечный сдвиг и изгиб установлено, что разрушение опытных образцов происходило по бетонному телу сваи, без признаков разрушения металлического штифтового соединения, без образования выколов бетона в районе штифтового соединения Leimet ABB+ 350 на четырех замках, что свидетельствует о его равнопрочности телу фрагмента секции железобетонной составной сваи при указанных воздействиях. При этом при величине растягивающей нагрузки 475,8–503,3 кН также не выявлено признаков повреждения штифтового соединения (испытания остановлены до разрушения образцов).



Рис. 4. Характерная схема разрушения опытных образцов серии СШС-1 при сжатии
Fig. 4. Characteristic destruction scheme of series 1 samples under compression



Рис. 5. Общие виды испытаний образцов серии СШС-2 при растяжении (разрушение образцов не достигнуто – отказ происходил по потере несущей способности специальных торцевых закладных деталей для фиксации в захватах испытательной машины)
Fig. 5. General views of the series 2 sample tensile testing (no destruction of samples was achieved – the failure occurred due to the loss of the bearing capacity of the special embedments for the fixation in the grips of the testing machine)



Рис. 6. Характерная схема разрушения опытных образцов серии СШС-3 при поперечном сдвиге
Fig. 6. Characteristic destruction scheme of series 3 samples under the transverse shear



Рис. 7. Характерная схема разрушения опытных образцов серии СШС-4 при изгибе
Fig. 7. Characteristic destruction scheme of series 4 samples under the bending

Таблица 1

Основные результаты испытаний

Table 1

Main test results

Шифр образца	Тип нагрузки	Максимальная нагрузка, зафиксированная при испытаниях	Характер разрушения образца	Повреждение штифтового соединения
СШС-1.1	Сжатие	553,5 т (5430 кН)	Разрушение по телу фрагмента секции сваи	Не установлено
СШС-1.2		527,5 т (5175 кН)		
СШС-1.3		542,5 т (5322 кН)		
СШС-2.1 (без косынок)	Растяжение	24,3 т (238,4 кН)	Разрушение образцов не достигнуто (испытания остановлены до разрушения образцов)	Не установлено
СШС-2.2		48,5 т (475,8 кН)		
СШС-2.3		51,3 т (503,3 кН)		
СШС-3.1	Поперечный сдвиг	78 т (765,2 кН)	Разрушение по телу фрагмента секции сваи	Не установлено
СШС-3.2		74 т (725,9 кН)		
СШС-3.3		70 т (686,7 кН)		
СШС-4.1	Изгиб	12,54 т×м (123,0 кН×м)		Не установлено
СШС-4.2		11,96 т×м (117,3 кН×м)		
СШС-4.3		12,25 т×м (120,2 кН×м)		

Благодарности

Авторы выражают благодарность АО «НИЦ «Строительство» и ООО «Коперник» за предоставленные материалы.

Список литературы

1. Серия 1.011.1-10. Сваи забивные железобетонные. Выпуск 8. Сваи составные сплошного квадратного сечения с ненапрягаемой арматурой. Рабочие чертежи. – Москва: ЦИТП Госстроя СССР, 1989. – 108 с.
2. Гайдо А.Н. Исследование конструктивно-технологических решений стыков заводских свай. [Электронный ресурс] // А.Н. Гайдо. – URL: http://trest28.ru/f/statya_gaydo_a.n._styki_svay.pdf (дата обращения 10.08.2021 г.).
3. Степанова М.А. Опытное обоснование применения штифтового стыка свай / М.А. Степанова, А.Н. Гайдо // Технология и организация строительства. Материалы I Всероссийской межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию основания кафедры «Строительное производство». Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 379–388.

4. Leimet Piling Quality [Электронный ресурс]. – Екатеринбург, 2019. – URL: <https://leimet.ru/> (дата обращения 20.11.2021).
5. ТУ 25.11.23-001-92894761-2018 «Соединение штифтовое для свай. Технические условия». – Екатеринбург: ООО «ГК «Коперник», 2018. – 27 с.
6. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Москва: Стандартинформ, 2019. – 20 с.

References

1. Series 1.011.1-10. The piles are driven reinforced concrete. Issue 8. Moscow: TSITP Gosstroy of the USSR; 1989 (in Russian).
2. *Gaido A.N.* Research of structural and technological solutions of joints of factory piles [Internet]. Available at: http://trest28.ru/f/statya_gaydo_a.n._styki_svoy.pdf (accessed 10 August 2021) (in Russian).
3. *Stepanova M.A., Gaido A.N.* Experimental substantiation of the use of a pin joint of piles. In: Technology and organization of construction. Materials of the I All-Russian interuniversity scientific and practical conference of young scientists dedicated to the 80th anniversary of the founding of the Department of "Construction Production". St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg; 2020, p. 379–388 (in Russian).
4. Leimet Piling Quality [Internet]. Yekaterinburg, 2019. Available at: <https://leimet.ru/> (accessed 20 November 2021) (in Russian).
5. ТУ 25.11.23-001-92894761-2018. Pin connection for piles. Technical conditions. Yekaterinburg: LLC "GC "Copernicus"; 2018 (in Russian).
6. State Standard 8829-2018. Reinforced concrete and factory-made concrete construction products. Methods of loading tests. Moscow: Standartinform Publ.; 2019 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Андрей Викторович Бучкин, канд. техн. наук, зам. зав. лабораторией коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Andrey V. Buchkin, Cand. Sci. (Engineering), deputy head of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Константин Львович Кудяков[✉], канд. техн. наук, зав. сектором лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, Москва

Konstantin L. Kudyakov[✉], Cand. Sci. (Engineering), head of the Sector of the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, associate professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Сергей Дмитриевич Епихин, инженер лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Sergey D. Epihin, engineer at the Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 699.841

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-30-52](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-30-52)

СЕЙСМОСТОЙКОСТЬ ЗДАНИЙ ИЗ КАРКАСНО-ОБШИВНЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КАРКАСОМ ИЗ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ ОЦИНКОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ: ОБЗОР И АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА

И.Р. ГИЗЯТУЛЛИН

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. Рассмотрены особенности поведения, достоинства и недостатки различных типов каркасно-обшивных стеновых конструкций с каркасом из стальных холодногнутоых оцинкованных профилей при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Показана актуальность исследования и обозначены проблемы, ограничивающие широкое распространение зданий из легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), возводимых в сейсмоопасных районах Российской Федерации.

Материалы и методы. Анализируются нормативные требования различных стран к расчету и проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, отечественные и зарубежные публикации с результатами ранее выполненных экспериментальных исследований. Использованы систематизация, структурный, сравнительный и сопоставительный анализы, теоретическое обобщение материалов, полученных при детальном анализе отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, а также литературных источников, содержащих информацию о результатах экспериментальных исследований каркасно-обшивных конструкций зданий на основе ЛСТК при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия.

Результаты. Представлен краткий обзор и анализ действующих отечественных и зарубежных нормативно-технических документов и результатов выполненных исследований в области расчета и проектирования зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах. Рассмотрены и обобщены результаты последних достижений в области экспериментальных исследований несущих и ненесущих каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК, а также элементов соединений при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия, чтобы продемонстрировать текущий прогресс, проблемы и будущие направления исследований. Отмечены различия в действующих нормативно-технических документах США и Канады в части назначения коэффициентов редуцирования сейсмических нагрузок, а также отставание европейского и отечественного нормативного документа в части регламентации требований к расчету и проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах.

Выводы. Представленные данные подтверждают необходимость теоретических и экспериментальных исследований, разработки и совершенствования нормативно-технических документов, которые позволят повысить надежность и механическую безопасность зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК и значительно расширить их распространение в сейсмоопасных районах России.

Ключевые слова: легкие стальные тонкостенные конструкции, каркасно-обшивные конструкции, сейсмостойкость, коэффициент допускаемых повреждений, испытания, экспериментальные исследования

Для цитирования: Гизятуллин И.Р. Сейсмостойкость зданий из каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей: обзор и анализ современного состояния вопроса // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 30–52. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-30-52](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-30-52)

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.

SEISMIC RESISTANCE OF FRAME-CLADDING BUILDINGS HAVING COLD-FORMED GALVANIZED STEEL CONSTRUCTION: REVIEW AND ANALYSIS OF CURRENT STATUS

I.R. GIZIATULLIN

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

Abstract

Introduction. The behaviors, advantages, and disadvantages of various types of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions under loads simulating seismic effects are considered. The paper stresses the relevance and demonstrates the problem of the widespread use of light gauge steel framing structures (LGSFS) in earthquake-prone areas in the Russian Federation.

Materials and methods. Normative requirements in different countries for calculating and designing frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions erected in earthquake-prone areas, as well as domestic and foreign literature, were analyzed, using structural, comparative, and matching analyzes, systematization, and theoretical generalization of obtained.

Results. A brief review and analysis of current domestic and foreign standard technical documents, as well as research findings in the field of the calculation and design of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions erected in earthquake-prone areas, are presented. The recent advances in studying load-bearing and non-load-bearing frame-cladding cold-formed galvanized steel structures and joint elements under simulated seismic loads were reviewed and summarized in order to demonstrate current progress, challenges, and prospects for future research. Differences in current standard technical documents used in the USA and Canada concerning seismic load reduction coefficients, as well as the weaknesses of the European and domestic normative documents in terms of regulating requirements for calculating and designing frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel constructions, erected in seismic areas, were addressed.

Conclusions. The presented data confirm the necessity of theoretical and experimental research and development and improvement of standard technical documents. These documents will allow the reliability and mechanical safety of frame-cladding buildings having cold-formed steel constructions to be improved and their distribution in earthquake-prone areas of Russia to be significantly extended.

Keywords: light gauge steel framing structures, frame-cladding structures, seismic resistance, seismic force reduction factor, tests, experimental studies

For citation: Giziatullin I.R. Seismic resistance of frame-cladding buildings having cold-formed galvanized steel construction: review and analysis of current status. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 30–52 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-30-52](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-30-52)

Author contribution statement

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

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Введение

Успех применяемых в строительстве зданий и сооружений материалов, конструкций и технических решений, как правило, зависит от способности удовлетворять потребности рынка, который все больше ориентируется на решения, характеризующиеся экономической эффективностью, скоростью возведения, энергоэффективностью и экологическими показателями производства конструкций, возведения строения и его сноса (утилизации).

Конструктивные системы зданий с применением каркасов из ЛСТК на основе стальных холодногнутох оцинкованных профилей достаточно давно востребованы на рынке строительства, но в кризисные времена, как показала пандемия COVID-19, технология сухого и быстровозводимого строительства с использованием ЛСТК оказалась особенно актуальной. По этим причинам конструктивные системы зданий и сооружений на основе ЛСТК переживают бум на протяжении многих лет как в области их применения для несущих конструкций, так и для ненесущих и самонесущих конструкций, и прежде всего для строительства зданий и сооружений в сейсмоопасных районах, где легкость играет одну из ключевых ролей в обеспечении их сейсмостойкости.

Использование холодногнутох стальных элементов в строительстве зданий началось в 1850-х годах как в США, так и в Великобритании. В 1920-х и 1930-х годах применение холодногнутох стали в качестве строительного материала все еще было ограниченным, поскольку в строительных нормативно-технических документах не было норм и правил проектирования несущих конструкций с использованием холодногнутох стальных тонкостенных элементов. Идея использования холодногнутох листовой стали для возведения стальных каркасов зданий массового рынка малоэтажного строительства существовала в течение долгого времени. Началом применения холодногнутох стальных элементов можно считать конец XIX и первую половину XX века [1]. Современная эпоха после Второй мировой войны началась с обилия мощностей по производству листовой стали и желания преобразования этих мощностей с военных на общегражданские цели. Сталелитейные заводы в США через Американский институт чугуна и стали (American Iron and Steel Institute (AISI)) профинансировали исследования, которые провел George Winter в Корнельском университете (Cornell University) [3, 4], в целях разработки технических условий для проектирования

легких холодногнутых стальных строительных конструкций. Эти усилия привели к появлению в 1946 г. технических условий AISI для проектирования легких холодногнутых стальных строительных конструкций [2], которые впоследствии были приняты в строительных нормативно-технических документах и, в результате различных итераций, легли в основу стандарта AISI S100-16 [10], регламентирующего требования к расчету и проектированию зданий и сооружений на основе легких холодногнутых стальных элементов.

В настоящее время в Российской Федерации происходит рост использования каркасов из ЛСТК на основе стальных холодногнутых оцинкованных профилей в строительстве зданий, но широкому их применению препятствует отсутствие норм проектирования зданий, возводимых в сейсмоопасных районах. В обзорной статье [8] авторы обращают внимание на отсутствие в действующих на тот момент нормах Российской Федерации указаний, касающихся расчета и особенностей проектирования зданий из ЛСТК в сейсмических районах. Отмечается важность проведения дополнительных экспериментальных исследований зданий, возводимых с применением указанной технологии, и уточнения методов их расчета на сейсмические воздействия.

В этом контексте в настоящей статье рассматривается технология строительства зданий на основе каркасов из ЛСТК с применением стальных холодногнутых оцинкованных профилей по принципу каркасно-обшивных конструкций и приводится краткий обзор последних исследований работы несущих и ненесущих каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК при действии нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Технология ЛСТК, кроме каркасно-обшивных конструкций, также представлена рамными конструкциями (стержневые горизонтальные и вертикальные элементы – балки и колонны, объединенные в общий пространственный каркас здания), возводимыми по принципу стальных каркасов из горячекатаного металлопроката, которые в данной работе не рассматриваются.

Сопrotивление сейсмическому воздействию каркасно-обшивных конструкций стен зданий из ЛСТК обеспечивается с помощью различных систем: крестообразной связи из стальных лент, панелей наружной и внутренней обшивок, смешанных решений, совмещающих применение связей и панелей обшивок.

Как в системах сопротивления сейсмическим силам с крестообразными связями, так и в системах сопротивления сейсмическим силам с обшивкой, в сейсмической реакции каркасно-обшивных конструкций стен зданий из ЛСТК преобладает высокая деградация прочности и жесткости (рис. 1).

На рис. 1 видно, что каркасно-обшивные конструкции стен зданий из ЛСТК с крестообразными связями демонстрируют более высокую начальную линейную жесткость, в то время как каркасные конструкции стен из ЛСТК с панелями обшивок из ГКЛ характеризуются существенным нелинейным поведением. В каркасных конструкциях стен из ЛСТК с крестообразными связями рассеивание энергии сейсмического воздействия происходит за счет деформирования (растяжение–сжатие) связей и развития в них пластических деформаций, в то время как в конструкциях стен из ЛСТК с панелями обшивок рассеивание энергии сейсмического воздействия происходит за счет деформации соединений обшивок и каркаса, а также повреждения панелей обшивок. При сопротивлении сейсмическим силам оба конструктивных решения испытывают существенное снижение прочности и жесткости. Однако, несмотря на их слабую гистерезисную реакцию по сравнению с традиционными

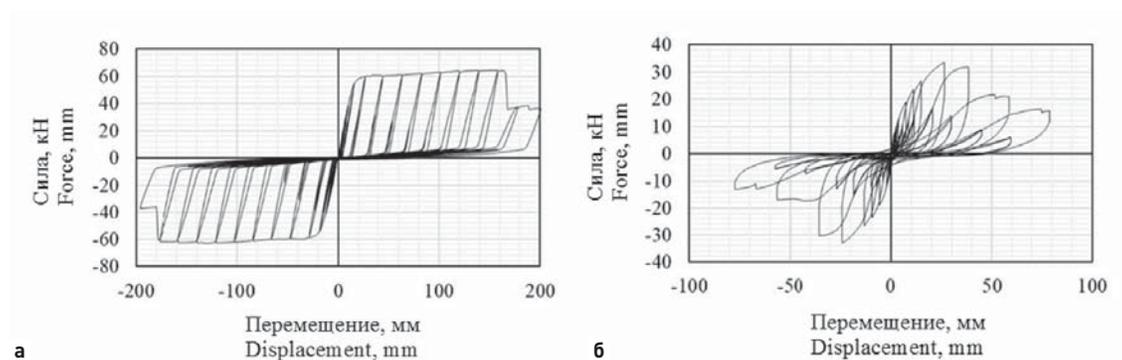


Рис. 1. Гистерезисный отклик типовых конструктивных систем, выполненных по технологии ЛСТК

на основе стального каркаса из холодногнутых профилей: а – поведение каркаса конструктивной системы с крестообразными связями [5]; б – поведение каркаса конструктивной системы с обшивкой из гипсокартонных листов (ГКЛ) [6]

Fig. 1. Hysteresis response of typical LGSFS structural systems based on a cold-formed steel construction: a – behavior of frame of structural system having cross bracing [5]; б – behavior of frame of structural system having plasterboard cladding [6]

стальными каркасами на основе горячекатаного проката, стальные каркасы зданий из ЛСТК, в основном из-за их легкости, могут быть конкурирующей альтернативой для строительства малоэтажных зданий и зданий средней этажности в сейсмоопасных районах.

Материалы и методы

Данное исследование является результатом выполненной автором, с целью обзора, демонстрации текущего прогресса, проблем и будущих направлений исследований, работы, связанной с поиском и анализом действующих отечественных и зарубежных нормативно-технических документов, а также литературных источников, содержащих информацию о результатах экспериментальных исследований каркасно-обшивных конструкций зданий с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Для достижения поставленной цели был выполнен анализ действующих нормативно-технических документов различных стран и литературный обзор результатов экспериментальных исследований несущих и ненесущих каркасно-обшивных стеновых конструкций, конструкций дисков перекрытий (покрытий) с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей, а также элементов соединений элементов каркаса и различных типов обшивок при действии на них нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия. Информация, полученная в ходе работы, систематизирована и структурирована, основные тезисы представлены в данной статье.

Результаты

Анализ нормативно-технических документов

Технология ЛСТК на российском рынке гражданского строительства появилась в 1990-х годах. Несмотря на то что технология ЛСТК была внедрена в практику строительства более 20 лет назад, система нормативно-технических документов в Российской

Федерации, регламентирующая технические требования и правила проектирования каркасов из ЛСТК, появилась только после 2016 г. с вступлением в силу СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованных профилей и гофрированных листов» [7], область применения которого не распространяется на проектирование зданий из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах. В России нормативным документом, устанавливающим нормы и правила проектирования зданий и сооружений, возводимых в сейсмических районах, является СП 14.13330.2018 «Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*» [8], при этом данный свод правил также не устанавливает требования к расчету и проектированию зданий из ЛСТК.

За границей целенаправленные массовые исследования поведения конструктивных решений зданий из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах, сопровождающиеся выпуском нормативно-технических документов, были начаты в конце 1970-х годов.

Нормы и правила проектирования зданий из ЛСТК, возводимых в сейсмических районах, уже установлены в североамериканском стандарте по сейсмическому проектированию зданий из ЛСТК (AISI S400 [11]), которые в настоящее время приняты в США, Канаде и Мексике. Стандарт распространяется на следующие конструктивные решения зданий из ЛСТК: с применением каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутого оцинкованных профилей с панелями обшивок из деревянных конструкционных панелей, стального листа или гипсокартона; каркасов с крестообразными связями из стальных лент, а также рамных каркасов с болтовыми соединениями (по принципу стальных каркасов на основе горячекатаного металлопроката).

AISI S400 предусматривает выбор механизмов рассеивания энергии диссипативных элементов конструктивной системы зданий из ЛСТК, устанавливает требования по сверхпрочности (*overstrength factor*) в отношении недиссипативных элементов конструктивной системы, а требования по использованию коэффициентов модификации отклика (ответа), учитывающих присущие конструктивной системе здания резервы прочности и пластичности.

Традиционный подход обеспечения сейсмостойкости зданий и сооружений реализуется посредством соблюдения правил проектирования и конструирования, нацеленных на создание в определенных элементах зон упругопластического деформирования, обеспечивающих пластичность и рассеивающую работу всей конструктивной системы в целом. Наличие пластических механизмов рассеивания энергии является фундаментальным требованием, предъявляемым к рассеивающим конструктивным системам.

В результате развития в конструктивной системе здания или сооружения пластических деформаций в процессе проектирования можно учесть снижение (редуцирование) сейсмических нагрузок. В методологии СП 14.13330.2018 снижение достигается умножением сейсмических нагрузок, полученных в результате линейного анализа, на коэффициент K_1 . Этот коэффициент позволяет учитывать нелинейный отклик здания или сооружения, связанный с материалом, конструктивной системой и процедурами проектирования, и выражается как коэффициент, учитывающий допускаемые повреждения зданий и сооружений, принимаемый по таблице 5.2 СП 14.13330.2018.

Нормативные документы США ASCE 7 [12], Канады NBCC [13] и Еврокода EN 1998-1 [14] также содержат коэффициенты редуцирования сейсмических нагрузок.

Таблица 1

Коэффициенты R регламентируемые для зданий с применением каркасов из ЛСТК в соответствии с ASCE 7 [12] и NBCC [13]

Table 1

Coefficients R regulated for LGSFS frame buildings following ASCE 7 [12] and NBCC [13]

№ п.п	Тип конструктивного решения	Коэффициент R, регламентируемый ASCE 7 [12]	Коэффициент R, регламентируемый NBCC [13]
1	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из деревянных конструкционных панелей	от 6.5 до 7	4.25
2	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из стального листа	от 6.5 до 7	2.6
3	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом с крестообразными связями из стальных лент	4	2.47
4	Рамные каркасы с болтовыми соединениями (по принципу стальных каркасов на основе горячекатаного металлопроката)	3.5	-
5	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из гипсокартона с одной стороны и из деревянных конструкционных панелей с другой	-	2.55
6	Каркасно-обшивные конструкции с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с панелями обшивок из гипсокартона или древесноволокнистой плиты	от 2 до 2.5	-

В Еврокоде EN 1998-1 [14] данный коэффициент обозначается как коэффициент q (behaviour factor), а в нормах США и Канады – как коэффициент R (response-modification factor).

При определении коэффициентов R , регламентируемых для зданий из ЛСТК, североамериканский стандарт AISI S400 [11] ссылается к ASCE 7 [12] для проектирования зданий, возводимых в США и Мексике, а также NBCC [13] для проектирования зданий, возводимых в Канаде. Значения соответствующих коэффициентов приведены в табл. 1.

В Еврокоде по сейсмическому проектированию EN 1998-1 [14] отсутствуют требования, посвященные проектированию зданий из ЛСТК. При этом, согласно действующей редакции технических требований европейского документа, проектирование зданий с каркасно-обшивочными конструкциями стен из ЛСТК с крестообразными связями и каркасов с обшивками из стального листа, может быть выполнено, при условии если рассматривать их в качестве традиционных стальных каркасов на основе горячекатаного проката, изготовленных с сечением класса 4, и рассмотрения конструктивных систем из них как стальных каркасов низкого уровня пластичности DCL (ductility class low) с низкой рассеивающей способностью. В этом случае коэффициент поведения q , принятый в европейских нормах и имеющий согласованность с коэффициентом R , может быть принят не более 1,5. Следует отметить, что проектирование в соответствии с этим принципом рекомендуется только для регионов с низкой сейсмичностью. Проектирование каркасно-обшивочных конструкций стен из ЛСТК с панелями обшивок из других материалов при использовании действующего Еврокода EN-1998-1 [14] не представляется возможным.

Краткий обзор выполненных исследований

Экспериментальные исследования по изучению поведения каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК под действием сейсмических нагрузок начались в конце 80-х гг. – начале 90-х гг. В работах под руководством С.А. Адхама [15, 16] были проведены экспериментальные исследования по оценке прочности и деформативности каркасно-обшивных конструкций стен зданий из ЛСТК с крестообразными связями и обшивками из гипсокартонных листов при сдвиговых (в плоскости каркаса) циклических нагрузках. Всего было испытано шесть образцов размером $2,4 \times 2,4$ м. В ходе экспериментальных исследований наблюдалось предположаемое соответствие между увеличением площади стальных лент связей и увеличением их вклада в общую несущую способность каркаса при средних и высоких значениях перекоса. Сдвиговая жесткость каркаса для стабилизированного цикла снизилась примерно на 7–15 % по сравнению со сдвиговой жесткостью соответствующего начального цикла. Деградация сдвиговой жесткости увеличивалась по мере увеличения величины перекоса каркаса. Способность каркаса рассеивать энергию в стабилизированном цикле составляла около 60 % от начального цикла.

В предыдущие годы испытания фрагментов и моделей зданий из ЛСТК с применением сейсмоплатформ выполнялись в США и Европе, хотя первый эксперимент был проведен в Австралии [17]. Исследование содержало обширную программу динамических испытаний как двух-, так и трехмерных конфигураций каркаса здания из ЛСТК. По результатам экспериментальных исследований был оценен вклад ненесущих элементов, в частности, облицовки из гипсокартонных панелей, сделан вывод, что стальные каркасы из ЛСТК хорошо сопротивляются сейсмическим нагрузкам, гипсокартонная обшивка при этом вносит вклад в сдвиговую жесткость основного каркаса.

Более масштабные исследования проводились в США, в рамках проекта «CFS-NEES», и включали испытания на сейсмоплатформе двухэтажного натурного экспериментального образца здания, конструкции стен и перекрытий которого были обшиты ориентированно-стружечными плитами (ОСП) [18–28]. Размеры экспериментального образца здания составили $7,0 \times 15,2$ м в плане и 5,9 м в высоту. Испытания проводились в два основных этапа как показано на рис. 2. Экспериментальные образцы зданий для испытаний в соответствии с этапами 1 и 2 были запроектированы с номинально идентичной конструктивной системой. Экспериментальный образец здания для испытаний по этапу 1 не включал каких-либо ненесущих конструкций и был возведен только с несущими элементами, обеспечивающими сопротивление сейсмической нагрузке. Экспериментальный образец здания для испытаний по этапу 2 был возведен с учетом ненесущих конструкций, включая наружную обшивку из панелей ОСП, внутреннюю обшивку из гипсокартонных листов, лестницы, внутренние перегородки и наружный облицовочный слой фасадов из армированным стекловолокном гипсовых панелей.

Испытание по этапу 2 было разделено на стадии строительства, для которых выполнялись низкоамплитудные испытания. Общей целью проекта «CFS-NEES» было развитие понимания о динамическом поведении конструктивной системы здания из ЛСТК при действии сейсмических нагрузок для улучшения методологической основы их проектирования. По результатам анализа экспериментальных исследований поперечная жесткость здания оказалась выше в 4 раза при учете конструкций стен, не предназначенных для восприятия



Рис. 2. Полномасштабные испытания экспериментального образца здания проекта «CFS-NEES»: *а* – общий вид экспериментального образца здания на этапе 1; *б* – общий вид экспериментального образца здания на этапе 2 [18]
Fig. 2. Full-scale tests of CFS-NEES building prototype: *a* – general view of building prototype, stage 1; *b* – general view of building prototype, stage 2 [18]

сейсмических нагрузок, и в 4,5 раза – при учете несущих элементов и конструкций здания. В целом, жесткость испытываемого фрагмента здания оказалась в 18 раз выше, чем численная модель этого здания, основанная только на несущих конструкциях, воспринимающих сейсмические воздействия.

В Калифорнийском университете в Сан-Диего были проведены исследования сейсмического поведения шестиэтажного здания (рис. 3), каркасы стен которого были обшиты с одной стороны стальными листами, а с другой стороны – гипсокартонными панелями [29, 30].

В рамках трехнедельной программы экспериментальных исследований здание подверглось 7 испытаниям сейсмической нагрузкой с возрастающей амплитудой колебаний, а также воздействию пожара с последующими испытаниями на сейсмические воздействия. Амплитуды колебаний были приняты, исходя из предъявляемых требований к эксплуатационной пригодности, конструктивной целостности и общей устойчивости здания при различных уровнях сейсмического воздействия. Впоследствии на двух выбранных этажах здания, получивших повреждения после первичных испытаний, были проведены огневые испытания. По результатам огневых испытаний здание было подвергнуто двум испытаниям на сейсмические нагрузки, соответствующие воздействию, имитирующему афтершок с малой амплитудой колебаний, и воздействию с максимальной амплитудой колебаний, имитирующему основное сейсмическое событие.

В Италии, в рамках европейского проекта «ELISSA», были проведены исследования, включающие испытания на сейсмоплатформе полномасштабного двухэтажного здания (рис. 4) с облицовкой конструкций стен гипсовыми панелями [31]. По результатам данных исследований было установлено, что динамические характеристики здания были значительно изменены с включением в работу отделочных ограждающих конструкций здания. Снижение основного периода собственных колебаний здания произошло ориентировочно на 20 %, что, по оценке авторов работы, соответствует увеличению сдвиговой жесткости здания примерно в 4,5 раза.

В рамках проекта «LAMIEREDIL» [31, 32] была проанализирована сейсмическая реакция двух трехэтажных моделей зданий в масштабе 1:3, выполненных из ЛСТК с ленточными крестообразными связями (рис. 5). Опытные образцы различались конструктивным решением перекрытий: для первого типа образца были выполнены сталежелезобетонные перекрытия по профлисту, для второго типа образца были выполнены перекрытия с обшивкой

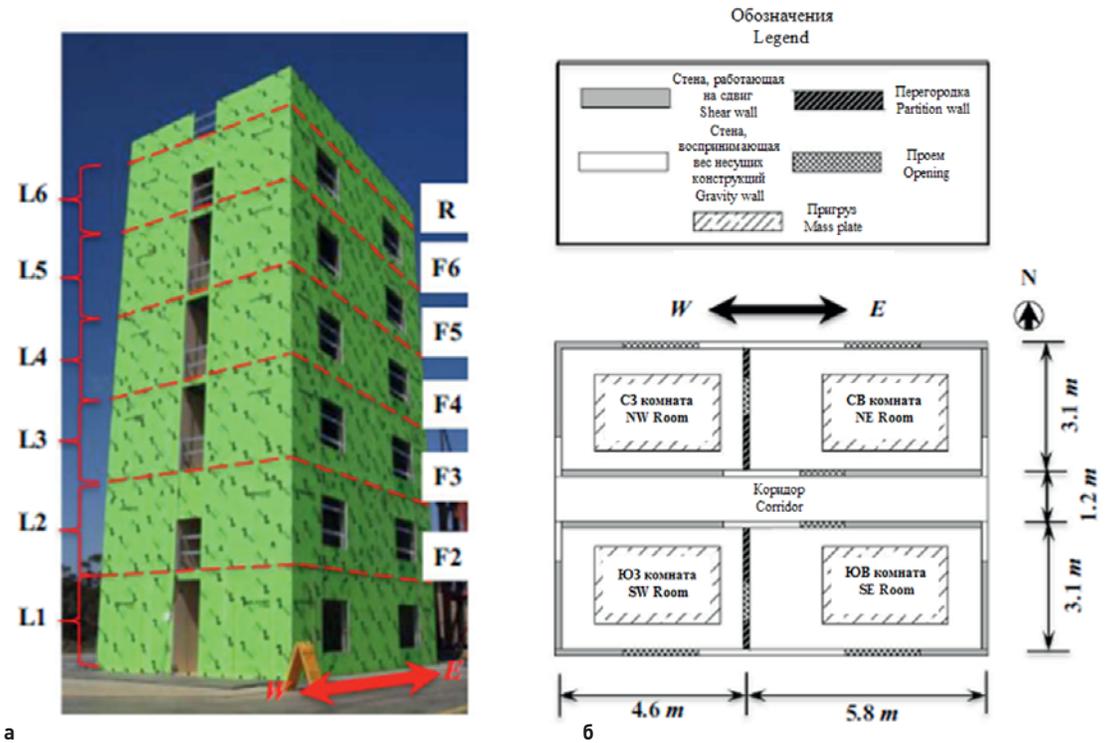


Рис. 3. Экспериментальный образец здания из ЛСТК: *а* – фотография образца здания на сейсмоплатформе; *б* – типовой план этажа здания [29]
Fig. 3. LGSFS building prototype: *a* – photo of building prototype on shake table; *b* – typical floor plan of building [29]

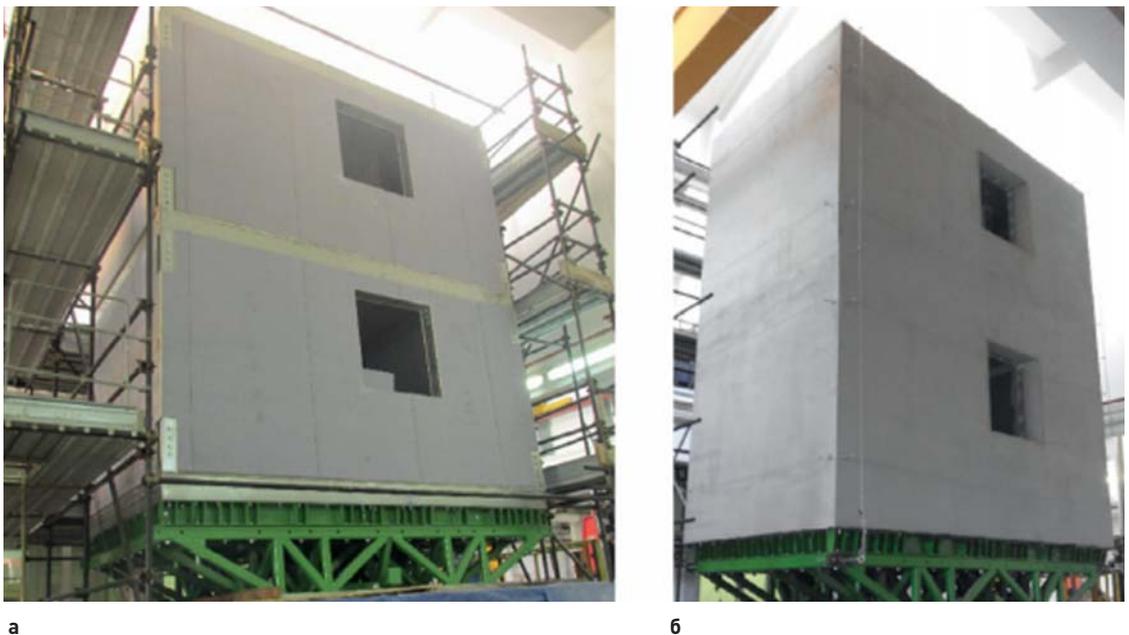


Рис. 4. Полномасштабные испытания экспериментального образца здания проекта «ELISSA»: *а* – первая фаза (неполная конструктивная система); *б* – вторая фаза (полная конструктивная система) [31]
Fig. 4. Full-scale tests of ELISSA building prototype: *a* – first stage (incomplete structural system); *b* – second stage (complete structural system) [31]

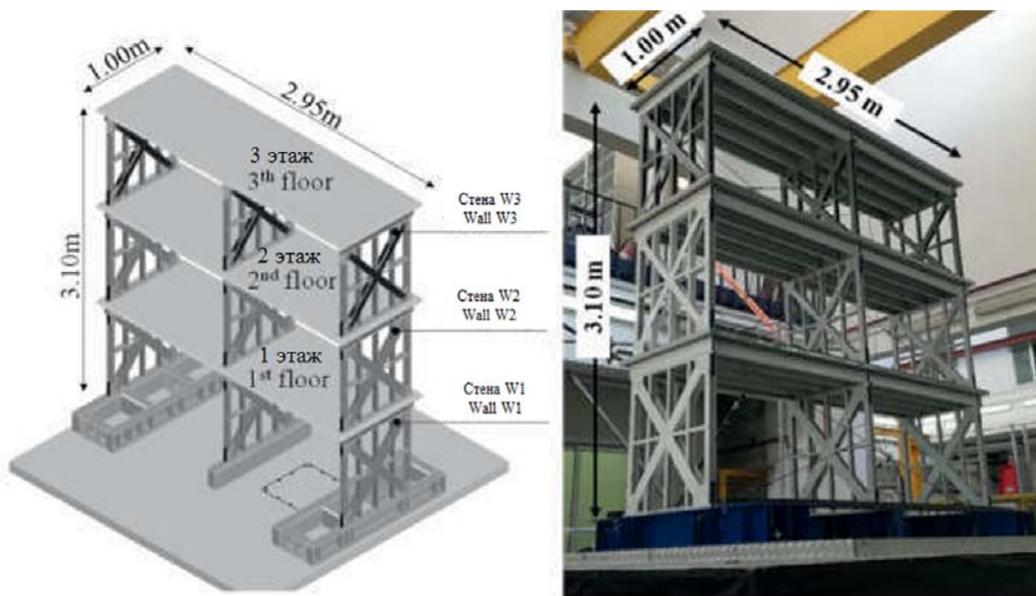


Рис. 5. Полномасштабные испытания экспериментального образца «LAMIEREDIL» [31]
Fig. 5. Full-scale tests of LAMIEREDIL prototype [31].

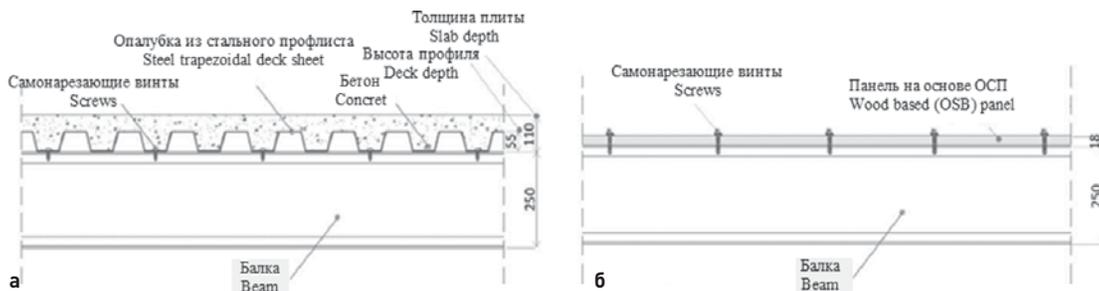


Рис. 6. Конструкция полов экспериментального образца «LAMIEREDIL» (размеры в мм) [32]:
 а – стале-железобетонное перекрытие по профлисту (образец первого типа); б – перекрытие с обшивкой ОСП панелями (образец второго типа)

Fig. 6. LAMIEREDIL floor prototype (dimensions in mm) [32]: а – composite floor having steel profiled sheeting (sample 1); б – floor having OSB cladding (sample 2)

ОСП панелями толщиной 18 мм (рис. 6). Исследование проводилось на сеймоплатформе, результаты испытаний показали, что глобальная реакция конструктивной системы была почти линейной для обоих образцов в рамках проектных уровней сейсмического воздействия. Для испытаний с более высокой интенсивностью сейсмического воздействия глобальная реакция системы отклонялась от линейной, образец получал повреждения, идентифицируемые при визуальном осмотре конструкций (деформации ленточных крестообразных связей, ослабление соединений).

Меньшее количество работ посвящено исследованию горизонтальных диафрагм жесткости (дисков перекрытий (покрытий) из ЛСТК, о чем свидетельствуют немногочисленные



а



б

Рис. 7. а – образец горизонтальной диафрагмы (перекрытия) с обшивкой из деревянных конструкционных панелей [34]; б – образец горизонтальной диафрагмы (перекрытия) со стальным настилом [35]

Fig. 7. а – sample of horizontal floor diaphragm having timber structural panel cladding [34]; б – sample of horizontal floor diaphragm having steel deck [35]

исследования, проведенные в Канаде на диафрагмах, обшитых деревянными конструкционными панелями (рис. 7, а), с различными конструктивными решениями и слоями отделочного материала [33, 34], а также диафрагм со стальным настилом (рис. 7, б) в Италии [35].

Активные исследования ведутся в области исследования соединений элементов каркаса между собой. Данные соединения можно сгруппировать на два вида: соединения сталь–сталь и соединения сталь–панель обшивки. Экспериментальные значения характеристик соединений между панелями обшивок и сталью имеет решающее значение для каркасно-обшивных конструкций, где материал обшивок и их соединений оказывают большое влияние на глобальную сейсмическую реакцию здания. В США исследовались соединения обшивок из деревянных конструкционных и гипсокартонных панелей [36–38], в Китае проводились исследования соединений обшивок из деревянных конструкционных, гипсокартонных, стекломагниевых и кальциево-силикатных панелей [39], в Италии исследовались соединения обшивок из гипсокартонных панелей [40, 41]. По результатам исследований установлено, что материал обшивки оказывает значительное влияние на сдвиговую реакцию соединения. Для соединений каркаса ЛСТК с обшивкой из деревянной конструкционной панели, которые демонстрируют большую прочность и способность рассеивать энергию, преобладающим видом разрушения является сквозное протягивание саморезов через зону соединения элементов (рис. 8, а), а также растрескивание панели обшивки по толщине (рис. 8, б).

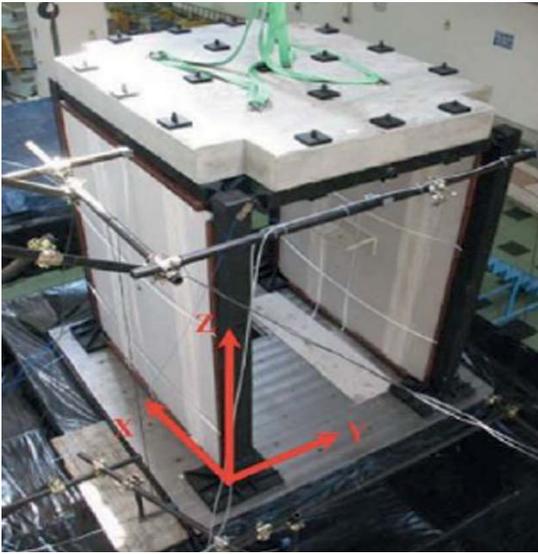
Активные работы ведутся и в области исследования поведения ненесущих конструкций из ЛСТК. Проведены испытания двухэтажного стального каркасного здания с перегородками и потолочными системами из ЛСТК (рис. 9, а) [43, 44], пятиэтажного железобетонного здания с конструкциями фасадов и перегородок из ЛСТК (рис. 9, б) [45], одноэтажных конструкций с перегородками (рис. 10, а) [46], перегородками и подвесными потолочными системами из ЛСТК (рис. 10, б) [46].



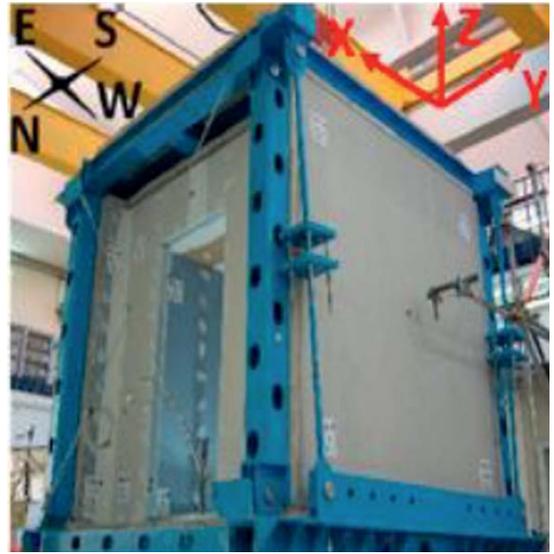
а
Рис. 8. Наблюдаемые виды отказов [42]: *а* – сквозные панели обшивки саморезов через зону соединения элементов; *б* – растрескивание панели обшивки по толщине
Fig. 8. Observed failure modes [42]: *a* – protruding self-tapping screw through element joint area; *b* – cladding panel cracking over thickness



а
Рис. 9. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий с несущими конструкциями из ЛСТК, испытанных на сейсмоплатформах: *а* – двухэтажное здание со стальным каркасом, включающее перегородки и потолочные системы из ЛСТК [43]; *б* – пятиэтажное железобетонное здание, включающее перегородки и фасадные системы [45]
Fig. 9. Experimental models and fragments of buildings with non-load-bearing LGSFS structures tested on shake table: *a* – e two-storey building having steel frame including LGSFS partition walls and ceiling systems [43]; *b* – five-storey reinforced concrete building including partition walls and facade systems [45]



а



б

Рис. 10. Экспериментальные образцы моделей и фрагментов зданий с несущими конструкциями из ЛСТК, испытанных на сейсмоплатформах: а – одноэтажный фрагмент здания, включающий перегородки [46]; б – одноэтажный фрагмент здания, включающий перегородки и подвесные потолки [47]

Fig. 10. Experimental models and fragments of buildings with non-load-bearing LGSFS structures tested on shake table: а – single storey building fragment including partition walls [46]; б – single storey building fragment including partition walls and suspended ceilings [47]



а



б

Рис. 11. а – экспериментальный образец фасадной панели в процессе динамических испытаний; б – общий вид силовой рамы для испытаний на перекос образца фасадной панели

Fig. 11. а – prototype of facing panel during dynamic testing; б – general view of load frame for warping tests of facing panel sample.

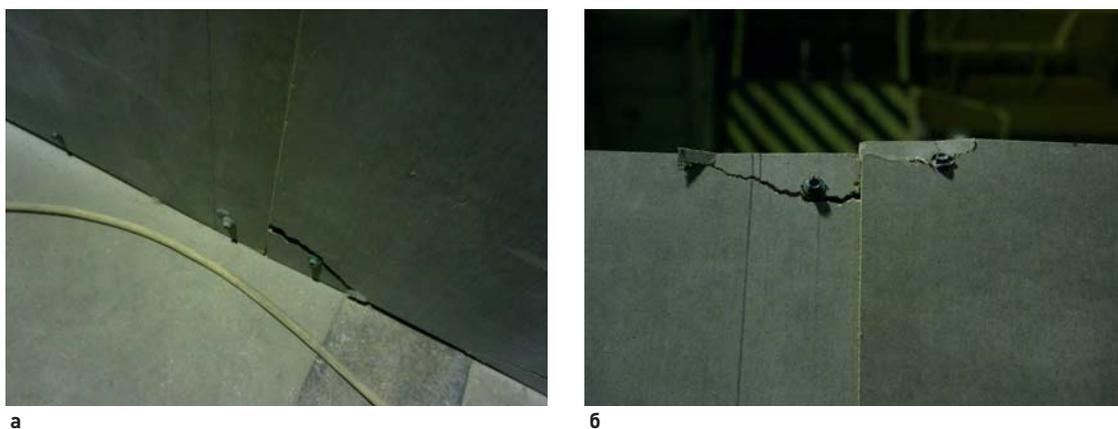


Рис. 12. Характер разрушения цементно-стружечной плиты в зоне: *а* – нижнего стыка соединения обшивок к стальному каркасу; *б* – верхнего стыка соединения обшивок к стальному каркасу
Fig. 12. Failure behavior of cement-bonded particle board: *a* – in lower joint of cladding to steel frame; *b* – in upper joint of cladding to steel frame.

Основными целями данных исследований была оценка сейсмического поведения несущих конструкций зданий, выполненных из ЛСТК при действии сейсмических нагрузок, а также оценка влияния различных конструктивных параметров на их сейсмостойкость. Испытанные гипсокартонные перегородки и подвесные потолочные системы демонстрируют хорошее сейсмическое поведение как в плоскости конструкции, так и из ее плоскости.

В Российской Федерации также ведутся активные исследования в данном направлении. На базе Центра исследований сейсмостойкости сооружений (ЦИСС) ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко проведены экспериментальные исследования навесных каркасно-обшивных конструкций фасадных панелей при действии статических и динамических нагрузок, моделирующих сейсмические воздействия интенсивностью 7–9 баллов по шкале MSK-64 (рис. 11) [48]. Экспериментальные исследования предусматривали проведение испытаний фасадных панелей из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с обшивками из гипсокартонных листов марки «Гуркос Стронг» толщиной 12,5 мм и цементно-стружечных плит (ЦСП) марки «Тамак» толщиной 12 мм.

Для оценки сдвигового сопротивления и предельных перекосов фасадных панелей были проведены испытания на сдвиговые статические нагрузки в плоскости панели (рис. 11, б). По результатам испытаний на статическую нагрузку был установлен качественный и количественный характер сдвигового сопротивления фасадных панелей, механизм отказа каркасно-обшивной конструкции и характер повреждения панелей обшивок (рис. 12) при различных значениях величины перекоса фасадных панелей.

По результатам динамических испытаний фасадной панели механическая безопасность, конструктивная целостность и эксплуатационная пригодность панели не была нарушена.

Специалистами ЦИСС ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко при поддержке Ассоциации развития стального строительства (АРСС) выполнена обширная программа экспериментальных исследований различных типов конструктивных решений каркасно-обшивных конструкций стеновых панелей с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей с одно- и двухслойными обшивками из ЦСП толщиной 10 и 20 мм соответственно, шагом закрепления панелей



Рис. 13. Общий вид экспериментальных образцов стеновых панелей из ЛСТК: *а* – с вертикальной X-образной связью; *б* – с однослойной наружной панелью обшивки из ЦСП толщиной 10 мм; *в* – с двухслойной наружной панелью обшивки из ЦСП толщиной 20 мм

Fig. 13. General view of prototype LGSFS wall panels: *a* – vertical X-joint; *b* – single-layer exterior 10 mm CBPB cladding; *v* – double-layer exterior 20 mm CBPB cladding

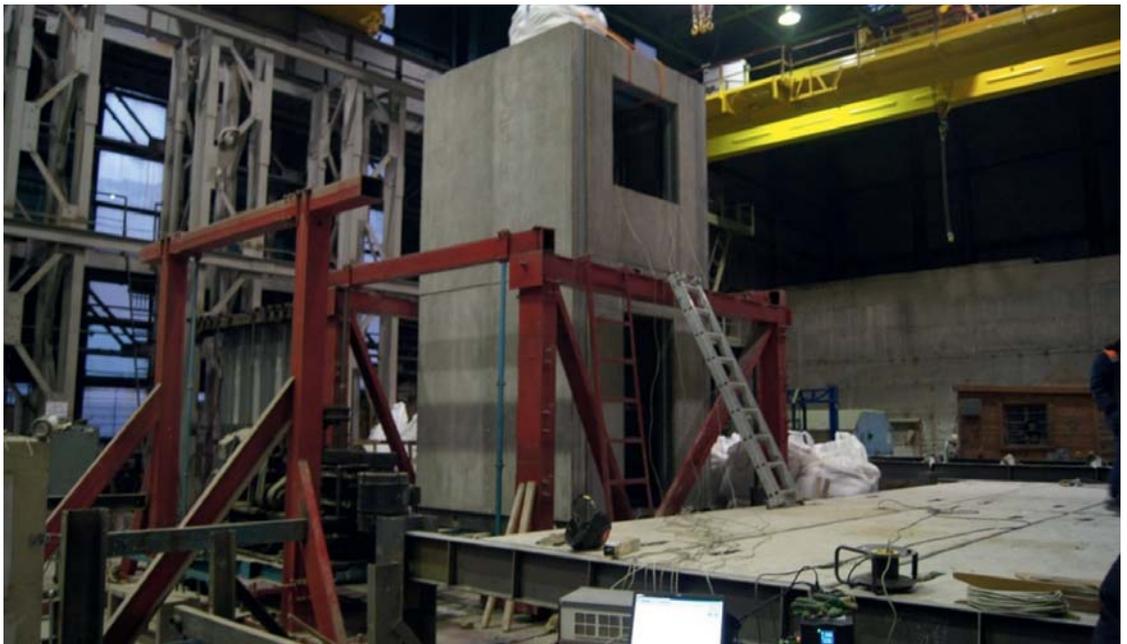


Рис. 14. Общий вид экспериментального образца двухэтажного фрагмента здания из ЛСТК

Fig. 14. General view of prototype two-storey LGSFS building fragment

обшивок к каркасу 150 и 300 мм, а также каркасно-обшивных конструкций стеновых панелей с вертикальной X-образной связью из стальных оцинкованных лент (рис. 13). Испытания предусматривали образцы конструкций каркаса из стальных холодногнутых оцинкованных профилей наружной несущей стеновой панели с габаритными размерами (без учета толщины обшивок) 3000 × 2400 × 200 мм (В × Ш × Т). Также программа работ предусматривала оценку общего динамического поведения конструктивного решения здания из ЛСТК на образце фрагмента двухэтажного здания вибрационным (резонансным) методом, позволяющим измерить количественно силовую нагрузку, имитирующую сейсмическое воздействие в широком диапазоне частот (рис. 14). Результаты настоящих экспериментальных исследований готовятся к публикации.

Настоящая работа была ориентирована на получение результатов, позволяющих сформулировать базовые требования к расчету и проектированию зданий из каркасно-обшивных конструкций на основе стального каркаса из холодногнутого профиля для исключения существующих барьеров по расчету и проектированию таких зданий в сейсмоопасных районах России. Полученные результаты могут быть использованы при разработке нормативно-технических и организационно-методических документов, в частности, при подготовке изменений к СП 14.13330.2018 «СНиП II-7-81* Строительство в сейсмических районах», в части расчета и проектирования несущих и ненесущих конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных регионах с расчетной сейсмичностью площадок 7–9 баллов по шкале MSK-64.

Заключение

В статье рассмотрены и проанализированы отечественные и зарубежные нормативно-технические документы, а также труды отечественных и зарубежных исследователей в части расчетов, проектирования и экспериментальных исследований каркасно-обшивных конструкций на основе стального каркаса из холодногнутого профиля.

Результаты анализа выполненных исследований и действующих нормативно-технических документов зарубежных стран, регламентирующих требования к проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, показывают, что на сегодняшний день ведутся активные исследования в данном направлении, при этом многие аспекты действительной работы таких конструкций при восприятии сейсмических нагрузок до сих пор не исследованы. В частности, как поведение ненесущих элементов и конструкций здания, так и их влияние на сейсмическую реакцию несущей системы играют ключевую роль, при этом одной из проблем нормирования требований к этим элементам и конструкциям заключается в очень большом разнообразии конструктивных решений каркасно-обшивных конструкций (разнообразие применяемых типов обшивок и их комбинаций, элементов их соединения, а также холодногнутого профиля), в т. ч. их физико-механических характеристик. Не в полной мере исследована работа каркасно-обшивных конструкций стен на основе стального каркаса из холодногнутого профиля при действии вертикальных сейсмических нагрузок, а также различные виды применяемых обшивок (аквапанели, стекломатные листы, фибролитовые плиты и т. д.).

Анализ действующих нормативно-технических документов зарубежных стран, регламентирующих требования к расчету и проектированию зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, показывает различия в принятых коэффициентах редукации сейсмических нагрузок. Европейские нормы [14], так же как и отечественные [8],

фактически не содержат нормативных требований к расчету и проектированию таких зданий, возводимых в сейсмоопасных районах, хотя результаты исследований для будущей актуализации действующих нормативных документов определенно имеются.

На сегодняшний день отсутствие норм и правил проектирования зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК, возводимых в сейсмоопасных районах, сдерживает их широкое распространение в России. Учитывая огромную площадь территории Российской Федерации, разнообразие климатических и сейсмических районов, а также особенности и разнообразие применяемых, на территории Российской Федерации, конструктивных решений каркасно-обшивных конструкций зданий из ЛСТК, исследование действительной работы таких конструкций при действии сейсмических нагрузок является важной и насущной задачей.

Для преодоления текущего отставания отечественного свода правил в области проектирования зданий и сооружений в сейсмических районах [8], расширения знаний и повышения уровня понимания о поведении зданий на основе каркасно-обшивных конструкций из ЛСТК при их работе в условиях сейсмических воздействий следует предусмотреть и провести комплекс научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, направленных на решение проблемы расчета и проектирования зданий из таких систем, которое не будет являться паллиативным.

Список литературы

1. Allen D. History of cold-formed steel / D. Allen // Structure Magazine. – 2006 November. – P. 28–32.
2. Specification for the design of light gage steel structural members / American Iron and Steel Institute. – Washington, DC, 1946.
3. Winter G. Strength of thin steel compression flanges / G. Winter // Transactions of the American Society of Civil Engineers. – 1947. – Vol. 112, no. 1. – P. 527–554. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006092>
4. Winter G. Thin-walled steel for modern structures: Thirty years of industry-sponsored research at Cornell / G. Winter // Engineering: Cornell Quarterly. – 1972. – Vol. 7, no. 1. – P. 2–12.
5. Seismic design method for CFS diagonal strap-braced stud walls: Experimental validation / L. Fiorino, O. Iuorio, V. Macillo [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2016. – Vol. 142, no. 3. – 04015154. [https://doi.org/10.1061/\[ASCE\]ST.1943-541X.0001408](https://doi.org/10.1061/[ASCE]ST.1943-541X.0001408)
6. Macillo V. Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Experimental tests / V. Macillo, L. Fiorino, R. Landolfo // Thin Walled Struct. – 2017. – No. 120. – P. 161–171. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.022>
7. СП 260.1325800.2016. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования: введены в действие 04.06.2017. – Москва: Минстрой России, 2016. – 124 с.
8. СП 14.13330.2018. Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 24 мая 2018 г. N 309/пр и введен в действие с 25 ноября 2018 г. – Москва: Стандартинформ, 2018. – 115 с.
9. Джинчвелашвили Г.А. Особенности применения легких стальных тонкостенных конструкций при строительстве зданий различного назначения в сейсмически активных регионах России / Г.А. Джинчвелашвили, А.В. Соснин // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2010. – № 3. – С. 57–61.
10. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members [Electronic Resource]: AISI S100-16 / American Iron and Steel Institute (AISI). – Washington, DC, USA, 2016. – Mode of access: https://cfsei.memberclicks.net/assets/docs/publications/aisi-standards/aisi_s100-16_s100-16-c_e_s.pdf
11. North American Standard for Seismic Design of Cold Formed Steel Structural Systems: AISI S400-15 / American Iron and Steel Institute (AISI). – Washington, DC, USA, 2015.

12. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures: ASCE 7-10 / American Society of Civil Engineers. – Reston, VA, USA, 2010.
13. NBCC. National Building Code of Canada / National Research Council of Canada (NRCC). – Ottawa, ON, Canada, 2005.
14. EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance – Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings [Electronic Resource] / European Committee for Standardization. – Brussels, Belgium, 2004. – Mode of access: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
15. Shear wall resistance of lightgauge steel stud wall systems: Final technical report, prepared for national science foundation under grant No. R-8716-6263, Dec 1988 / S.A. Adham, V. Avanesian, G.C. Hart [et al.].
16. Shear wall resistance of lightgauge steel stud wall systems / S.A. Adham, V. Avanesian, G.C. Hart [et al.] // Earthquake Spectra. – 1990. – Vol. 6, no. 1. – P. 1–14. <https://doi.org/10.1193/1.1585555>
17. Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures / E.F. Gad, C.F. Duffield, G.L. Hutchinson [et al.] // Engineering Structures. – 1999. – Vol. 21, no. 1. – P. 83–95. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)90129-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)90129-2)
18. Seismic response and engineering of cold-formed steel framed buildings / B.W. Schafer, D. Ayhan, J. Leng // Structures. – 2016. – Vol. 8, Part 2. – P. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
19. Computationally Efficient Fastener-Based Models of Cold-Formed Steel Shear Walls with Wood Sheathing / S.G. Buonopane, G. Bian, T.H. Tun, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2015. – Vol. 110. – P. 137–148. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.008>
20. Ayhan D. Cold-formed steel member bending stiffness prediction / D. Ayhan, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2015. – Vol. 115. – P. 148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.004>
21. Peterman K.D. Hysteretic Characterization of Cold-Formed Steel Stud-to-Sheathing Connections / K.D. Peterman, N. Nakata, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 101. – P. 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
22. Impact of construction details on OSB-sheathed cold-formed steel framed shear walls / O. Liu, K.D. Peterman, C. Yu, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 101. – P. 114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.003>
23. Peterman K.D. Behavior of Full-Scale Cold-Formed Steel Buildings Under Seismic Excitations: Ph.D. Dissertation / K.D. Peterman; Johns Hopkins University. – Baltimore, Maryland, May 2014.
24. Leng J. Simulation of Cold-Formed Steel Structures: Ph.D. Dissertation / J. Leng; Johns Hopkins University. – Baltimore, Maryland, August 2015.
25. Characterizing Joist-Ledger Performance for Cold-Formed Steel Light Frame Construction / D. Ayhan, Y. Qin, S. Torabian, B.W. Schafer // Eighth International Conference on Advances in Steel Structures, Lisbon, Portugal, July 2015. – P. 22–24.
26. Seismic Response and Engineering of Cold-Formed Steel Framed Buildings / B.W. Schafer, D. Ayhan, J. Leng [et al.] // Structures. – 2016. – Vol. 8. – P. 197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
27. Peterman K.D. Experimental Determination of Base Shear from Full-Scale Shake Table Testing of Two Cold-Formed Steel Framed Buildings / K.D. Peterman, B.W. Schafer // Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015. Shanghai, China, July 1–4, 2015.
28. OpenSees modeling of cold formed steel framed wall system / G. Bian, D.A. Padilla-Llano, J. Leng [et al.] // Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015. Shanghai, China, July 1–4, 2015.
29. Behavior of steel-sheathed shear walls subjected to seismic and fire loads / M.S. Hoehler, C.M. Smith, T.C. Hutchinson // Fire Safety Journal. – 2017. – Vol. 91. – P. 524–531. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.021>
30. Earthquake and fire performance of a mid-rise cold-formed steel framed building – test program and test results: rapid release (preliminary) report SSRP-2016/07 / X. Wang, T.C. Hutchinson, G. Hegemier [et al.]. – San Diego, CA, 2016.
31. Fiorino L. Shake table tests of a full-scale two-story sheathing-braced cold-formed steel building / L. Fiorino, V. Macillo, R. Landolfo // Engineering Structures. – 2017. – Vol. 151. – P. 633–647. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.056>
32. Campiche A. Numerical Modelling of CFS Three-Story Strap-Braced Building under Shaking-Table Excitations / A. Campiche // Materials. – 2021. – Vol. 14, no. 1. – P. 118. <https://doi.org/10.3390/ma14010118>
33. Characterization of cold-formed steel framed diaphragm response under in-plane loading and influence of non-structural gypsum panels / P. Latreille, V. Nikolaidou, C.A. Rogers, D.G. Lignos // CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. – St. Louis, MO, USA, 2010. – P. 1.

- 34.** Characterization of cold-formed steel framed/woodsheathed floor and roof diaphragm structures / V. Nikolaidou, P. Latreille, C.A. Rogers, D.G. Lignos // 6th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE), Santiago, Chile, January 9–13, 2017. – Santiago, Chile: International Association of Earthquake Engineering, 2017. – P. 452.
- 35.** Study of cold-formed steel floor systems under shear loadings / N. Baldassino, M. Bernardi, R. Zandonini, M. Zordan // Proceedings of the Eighth International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2018), Lisbon, Portugal, 24–27 July 2018.
- 36.** Vieira L.C.M. Lateral stiffness and strength of sheathing braced cold-formed steel stud walls / L.C.M. Vieira, B.W. Schafer // Engineering Structures. 2012. – Vol. 37. – P. 205–213. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.029>
- 37.** Peterman K.D. Hysteretic characterization of cold-formed steel stud-to-sheathing connections / K.D. Peterman, N. Nakata, B.W. Schafer // Journal of Constructional Steel Research. – 2014. – Vol. 101. – P. 254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
- 38.** Swensen S. Behavior of screw and adhesive connections to gypsum wallboard in wood and cold-formed steel-framed wallpanels / S. Swensen, G.G. Deierlein, E. Miranda // Journal of Structural Engineering. – 2016. – Vol. 142, no. 4. – E4015002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001307)
- 39.** Ye J. Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing / J. Ye, X. Wang, M. Zhao // Journal of Constructional Steel Research. – 2016. – Vol. 121. – P. 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.027>
- 40.** Fiorino L. Experimental characterization of quick mechanical connecting systems for cold-formed steel structures / L. Fiorino, V. Macillo, R. Landolfo // Advances in Structural Engineering. – 2017. – Vol. 20, no. 7. – 1098–1110. <https://doi.org/10.1177/1369433216671318>
- 41.** Experimental study on screwed connections for sheathed CFS structures with gypsum or cement based panels / L. Fiorino, T. Pali, B. Bucciero [et al.] // Thin-Walled Structures. – 2017. – Vol. 116. – P. 234–249. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.031>
- 42.** Serrette R. Wood structural panel to cold-formed steel shear connections with pneumatically driven knurled steel pins / R. Serrette, D. Nolan // Practice Periodical on Structural Design and Construction. – 2017. – Vol. 22. – 04017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000321)
- 43.** Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems / C. Jenkins, S. Soroushian, E. Rahmanishamsi, E. Maragakis // Proceedings of the Structures Congress 2015, Portland, OR, USA, 23–25 April 2015. – P. 1760–1773.
- 44.** Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems / C. Jenkins, S. Soroushian, E. Rahmanishamsi, E. Maragakis // Thin Walled Structures. – 2016. – Vol. 103. – P. 115–127. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.015>
- 45.** Seismic performance of cold-formed steel wall systems in a full-scale building / X. Wang, E. Pantoli, T.C. Hutchinson [et al.] // Journal of Structural Engineering. – 2015. – Vol. 141, no. 10. – 04015014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001245)
- 46.** Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests / G. Magliulo, C. Petrone, V. Capozzi [et al.] // Bulletin of Earthquake Engineering. – 2014. – Vol. 12. – P. 1657–1677. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9567-8>
- 47.** Fiorino L. Evaluation of seismic dynamic behaviour of drywall partitions, façades and ceilings through shake table testing / L. Fiorino, B. Bucciero, R. Landolfo // Engineering Structures. – 2019. – Vol. 180. – P. 103–123. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.028>
- 48.** Сейсмостойкость зданий из каркасно-обшивных конструкций с каркасом из стальных холодногнутых оцинкованных профилей / А.А. Бубис, И.Р. Гизятуллин, А.И. Доттуев, Т.В. Назмеева // Вестник НИЦ «Строительство». – 2021. – Т. 31, № 4. – С. 98–109. [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-98-109](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-98-109)

References

1. Allen D. History of cold-formed steel. *Structure Magazine*. 2006 November:28–32.
2. American Iron and Steel Institute. Specification for the design of light gage steel structural members. Washington, DC; 1946.
3. Winter G. Strength of thin steel compression flanges. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*. 1947;112(1):527–554. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006092>
4. Winter G. Thin-walled steel for modern structures: Thirty years of industry-sponsored research at Cornell. *Engineering: Cornell Quarterly*, 1972;7(1):2–12. <https://doi.org/http://hdl.handle.net/1813/2277>
5. Fiorino L., Iuorio O., Macillo V., Terracciano M.T., Pali T., Landolfo R. Seismic design method for CFS diagonal strap-braced stud walls: Experimental validation. *Journal of Structural Engineering*. 2016;142(3):04015154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001408](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001408)
6. Macillo V., Fiorino L., Landolfo R. Seismic response of CFS shear walls sheathed with nailed gypsum panels: Experimental tests. *Thin Walled Struct.* 2017;120:161–171. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.08.022>
7. SP 260.1325800.2016. Thin-walled steel structures made of cold-bent galvanized profiles and corrugated sheets. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2016 (in Russian).
8. SP 14.13330.2018. Construction in seismic areas. Updated version of SNiP II-7-81*. Moscow: Standartinform; 2018 (in Russian).
9. Jinchvelashvili G.A., Sosnin A.V. Features of the use of light steel thin-walled structures in the construction of buildings for various purposes in seismically active regions of Russia. *Seismostoitkoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety*. 2010;(3):57–61 (in Russian).
10. AISI S100-16. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. – Washington, DC, USA; 2016. Available at: https://cfsei.memberclicks.net/assets/docs/publications/aisi-standards/aisi100-16s100-16-c_e_s.pdf
11. AISI. S400-15 North American Standard for Seismic Design of Cold Formed Steel Structural Systems. Washington, DC, USA; 2015.
12. ASCE 7-10. Minimum Design Loads for Buildings and other Structures. Reston, VA, USA; 2010.
13. NBCC. National Building Code of Canada. Ottawa, ON, Canada: National Research Council of Canada (NRCC); 2005.
14. EN 1998-1 Eurocode 8: Design of Structures for Earthquake Resistance - Part 1: General Rules, Seismic Actions and Rules for Buildings. Brussels, Belgium; 2004. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/02/en.1998.1.2004.pdf>
15. Adham S.A., Avanesian V., Hart G.C., Anderson R.W., Elmlinger J., Gregory J. Shear wall resistance of lightgage steel stud wall systems. Final technical report, prepared for national science foundation under grant No. R-8716-6263, Dec 1988.
16. Adham S.A., Avanesian V., Hart G.C., Anderson R.W., Elmlinger J., Gregory J. Shear wall resistance of lightgage steel stud wall systems. *Earthquake Spectra*. 1990;6(1):1–14. <https://doi.org/10.1193/1.1585555>
17. Gad E.F., Duffield C.F., Hutchinson G.L., Mansell D.S., Stark G. Lateral performance of cold-formed steel-framed domestic structures. *Engineering Structures*. 1999;21(1):83–95. [https://doi.org/10.1016/S0141-0296\(97\)90129-2](https://doi.org/10.1016/S0141-0296(97)90129-2)
18. Schafer B.W., Ayhan D., Leng J., Liu P., Padilla-Llano D., Peterman K.D., et al. Seismic response and engineering of cold-formed steel framed buildings. *Structures*. 2016;8(2):197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
19. Buonopane S.G., Bian G., Tun T.H., Schafer B.W. Computationally Efficient Fastener-Based Models of Cold-Formed Steel Shear Walls with Wood Sheathing. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015;110:137–148. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.03.008>
20. Ayhan D., Schafer B.W. Cold-formed steel member bending stiffness prediction. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015;115:148–159. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.07.004>
21. Peterman K.D., Nakata N., Schafer B.W. Hysteretic Characterization of Cold-Formed Steel Stud-to-Sheathing Connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;101:254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
22. Liu O., Peterman K.D., Yu C., Schafer B.W. Impact of construction details on OSB-sheathed cold-formed steel framed shear walls. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;101:114–123. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.003>
23. Peterman K.D. Behavior of Full-Scale Cold-Formed Steel Buildings Under Seismic Excitations. Ph.D. Dissertation. Baltimore, Maryland; Johns Hopkins University; 2014.

- 24.** *Leng J.* Simulation of Cold-Formed Steel Structures. Ph.D. Dissertation. Baltimore, Maryland; Johns Hopkins University; 2015.
- 25.** *Ayhan D., Qin Y., Torabian S., Schafer B.W.* Characterizing Joist-Ledger Performance for Cold-Formed Steel Light Frame Construction. In: Eighth International Conference on Advances in Steel Structures; Lisbon, Portugal; July 2015. p. 22–24.
- 26.** *Schafer B.W., D. Ayhan, Leng J., Liu P., Padilla-Llano D., Peterman K.D., et al.* Seismic Response and Engineering of Cold-Formed Steel Framed Buildings. *Structures*. 2016;8:197–212. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2016.05.009>
- 27.** *Peterman K.D., Schafer B.W.* Experimental Determination of Base Shear from Full-Scale Shake Table Testing of Two Cold-Formed Steel Framed Buildings. In: Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015; Shanghai, China; July 1–4, 2015.
- 28.** *Bian G., Padilla-Llano D.A., Leng J., Buonopane S.G., Moen C.D., Schafer B.W.* OpenSees modeling of cold formed steel framed wall system. In: Proc. of the 8th International Conference on Behavior of Steel Structures in Seismic Areas - STESSA 2015; Shanghai, China; July 1–4, 2015.
- 29.** *Hoehler M.S., Smith C.M., Hutchinson T.C., Wang X., Meacham B.J., Kamath P.* Behavior of steel-sheathed shear walls subjected to seismic and fire loads. *Fire Safety Journal*. 2017;91:524–531. <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2017.03.021>
- 30.** *Wang X., Hutchinson T.C., Hegemier G., Gunisetty S., Kamath P., Meacham B.* Earthquake and fire performance of a mid-rise cold-formed steel framed building – test program and test results: rapid release (preliminary) report SSRP-2016/07. San Diego, CA; 2016.
- 31.** *Fiorino L., Macillo V., Landolfo R.* Shake table tests of a full-scale two-story sheathing-braced cold-formed steel building. *Engineering Structures*. 2017;151:633–647. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2017.08.056>
- 32.** *Campiche A.* Numerical Modelling of CFS Three-Story Strap-Braced Building under Shaking-Table Excitations. *Materials*. 2021;14(1):118. <https://doi.org/10.3390/ma14010118>.
- 33.** *Latreille P., Nikolaidou V., Rogers C.A., Lignos D.G.* Characterization of cold-formed steel framed diaphragm response under in-plane loading and influence of non-structural gypsum panels. In: CCFSS Proceedings of International Specialty Conference on Cold-Formed Steel Structures. St. Louis, MO, USA; 2010. p. 1.
- 34.** *Nikolaidou V., Latreille P., Rogers C.A., Lignos D.G.* Characterization of cold-formed steel framed/ woodsheathed floor and roof diaphragm structures. In: 6th World Conference on Earthquake Engineering (16WCEE), Santiago, Chile, January 9-13, 2017. Santiago, Chile: International Association of Earthquake Engineering; 2017. p. 452.
- 35.** *Baldassino N., Bernardi M., Zandonini R., Zordan M.* Study of cold-formed steel floor systems under shear loadings. In: Proceedings of the Eighth International Conference on Thin-Walled Structures (ICTWS 2018); Lisbon, Portugal; 24–27 July 2018.
- 36.** *Vieira L.C.M., Schafer B.W.* Lateral stiffness and strength of sheathing braced cold-formed steel stud walls. *Engineering Structures*. 2012;37:205–213. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.12.029>
- 37.** *Peterman K.D., Nakata N., Schafer B.W.* Hysteretic characterization of cold-formed steel stud-to-sheathing connections. *Journal of Constructional Steel Research*. 2014;101:254–264. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2014.05.019>
- 38.** *Swensen S., Deierlein G.G., Miranda E.* Behavior of screw and adhesive connections to gypsum wallboard in wood and cold-formed steel-framed wall/joints. *Journal of Structural Engineering*. 2016;142(4):E4015002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001307](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001307)
- 39.** *Ye J., Wang X., Zhao M.* Experimental study on shear behavior of screw connections in CFS sheathing. *Journal of Constructional Steel Research*. 2016;121:1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2015.12.027>
- 40.** *Fiorino L., Macillo V., Landolfo R.* Experimental characterization of quick mechanical connecting systems for cold-formed steel structures. *Advances in Structural Engineering*. 2017;20(7):1098–1110. <https://doi.org/10.1177/1369433216671318>
- 41.** *Fiorino L., Pali T., Bucciero B., Macillo V., Teresa Terracciano M., Landolfo R.* Experimental study on screwed connections for sheathed CFS structures with gypsum or cement based panels. *Thin-Walled Structures*. 2017;116:234–249. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2017.03.031>
- 42.** *Serrette R., Nolan D.* Wood structural panel to cold-formed steel shear connections with pneumatically driven knurled steel pins. *Practice Periodical on Structural Design and Construction*. 2017;22:04017002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)SC.1943-5576.0000321](https://doi.org/10.1061/(ASCE)SC.1943-5576.0000321)

43. *Jenkins C., Soroushian S., Rahmanishamsi E., Maragakis E.* Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems. In: Proceedings of the Structures Congress 2015; Portland, OR, USA; 23–25 April 2015. p. 1760–1773.
44. *Jenkins C., Soroushian S., Rahmanishamsi E., Maragakis E.M.* Experimental fragility analysis of cold-formed steel-framed partition wall systems. *Thin-Walled Structures*. 2016;103:115–127. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.02.015>
45. *Wang X., Pantoli E., Hutchinson T.C., Restrepo J.I., Wood R.L., Hoehler M.S., et al.* Seismic performance of cold-formed steel wall systems in a full-scale building. *Journal of Structural Engineering*. 2015;141(10):04015014. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001245](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001245)
46. *Magliulo G., Petrone C., Capozzi V., Maddaloni G., Lopez P., Manfredi G.* Seismic performance evaluation of plasterboard partitions via shake table tests. *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2014;12:1657–1677. <https://doi.org/10.1007/s10518-013-9567-8>
47. *Fiorino L., Buciero B., Landolfo R.* Evaluation of seismic dynamic behaviour of drywall partitions, façades and ceilings through shake table testing. *Engineering Structures*. 2019;180:103–123. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.11.028>
48. *Bubis A.A., Gizyatullin I.R., Dottuev A.I., Nazmeeva T.V.* Earthquake resistance of buildings made of frame-sheathing structures with a frame made of cold-bent galvanized steel profiles. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2021;31(4):98–109 (in Russian). [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4\(31\)-98-109](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-4(31)-98-109)

Информация об авторе / Information about the author

Ильнур Раэлевич Гизятуллин, заведующий сектором расчета сооружений (ЛССИМС), ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: gizatullin1994@yandex.ru

Ilnur R. Giziatullin, Head of Department, Department of Structural Engineering (LSSIMS), Research Institute of Building Constructions (TSNIISK) named after V. A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: gizatullin1994@yandex.ru

УДК 694.14

doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-53-64](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64)

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ УЗЛОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ ДРЕВЕСИНЫ ПЕРЕКРЕСТНОКЛЕЕНОЙ НА ВИНТАХ, В ТОМ ЧИСЛЕ ДЛЯ МНОГОЭТАЖНЫХ ЗДАНИЙ

А.Р. САЛИМУЛЛИН^{1,2,✉}П.Н. СМИРНОВ¹, канд. техн. наук¹Центральный 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 Федерация²ФГБВОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет» Минобрнауки России (НИУ МГСУ), Ярославское шоссе, д. 26, г. Москва, 129337, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Прочность и деформативность соединений панелей из древесины перекрестноклееной (далее по тексту – ДПК/CLT) играют важную роль в обеспечении прочности и жесткости несущего каркаса здания. Актуальность исследования обосновывается тем, что несмотря на большое количество исследований соединений ДПК/CLT, в европейских и североамериканских нормах проектирования отсутствуют данные в части пластической работы, коэффициентов запасов прочности и характера разрушения используемых соединений.

Целью работы являлось определение несущей способности, коэффициентов жесткости и пластичности узловых соединений ДПК/CLT с учетом конструктивных особенностей древесины перекрестноклееной.

Материалы и методы. На основании установленных наиболее распространенных решений узловых соединений панелей ДПК/CLT («внахлест», «с прокладкой», «с накладкой», «встык» и «угловой») были изготовлены серии образцов для их последующих испытаний с вариацией по количеству слоев и диаметру винтов. Методика исследования была разработана на основе ГОСТ 33082-2014 и анализе зарубежного опыта. Исследования проводились на базе лаборатории несущих деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко.

Результаты. На основе экспериментальных данных установлены нормативная и расчетная несущая способность, коэффициенты жесткости и пластичности для пяти типов соединений ДПК/CLT в зависимости от количества и направления наружных слоев, а также от диаметра винтов. Для оценки работы соединений за пределом упругой работы предлагается использовать шкалу оценки пластичности – соединение может быть хрупкое, с низкой пластичностью, с умеренной пластичностью и высокой пластичностью.

Выводы. Конструктивные особенности ДПК/CLT, такие как количество слоев, их толщина, а также ориентация внешних слоев оказывают существенное влияние на прочностные и деформационные характеристики узловых соединений ДПК/CLT на винтах. Результаты исследований предполагается использовать при актуализации СП 299.13258800.2017 «Конструкции деревянные с узлами на винтах».

Ключевые слова: древесина перекрестноклееная, деревянные конструкции, узловое соединение, соединения на винтах, прочность, деформативность, податливость, несущая способность, методы испытаний

Для цитирования: Салимуллин А.Р., Смирнов П.Н. Разработка и исследование узловых соединений древесины перекрестноклееной на винтах, в том числе для многоэтажных зданий // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 53–64. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-53-64](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64)

Вклад авторов

Смирнов П.Н. – формирование идеи; формулировка или развитие ключевых целей и задач.

Салимуллин А.Р. – проведение исследований, в частности проведение экспериментов или сбор данных/доказательств, анализ и интерпретация полученных данных.

Финансирование

Исследование проводилось при государственном финансировании.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

DEVELOPMENT AND RESEARCH OF SCREWED CROSS-LAMINATED TIMBER NODAL JOINTS FOR MULTI-STOREY BUILDINGS

A.R. SALIMULLIN^{1,2✉}

P.N. SMIRNOV¹, Cand. Sci. [Engineering]

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

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

Abstract

Introduction. The strength and deformability of cross-laminated timber (CLT) panels ensure the strength and stiffness of load-bearing frames. However, despite numerous studies on CLT joints, data on plastic behavior, safety coefficient, and the failure behavior of used joints are lacking in European and North American design standards.

Aim. The work addresses the load-bearing capacity, coefficients of stiffness and ductility of CLT joints, following the design features of cross-laminated timber.

Materials and methods. A series of samples were produced based on conventional solutions for CLT panels (“overlap,” “gasket-sealed,” “strapped,” “butt,” and “halved corner”), having various layers and diameters of a screw, and subjected to subsequent testing. The research procedure was developed following GOST 33082-2014 and foreign practices. The research was carried out at the Laboratory of Timber Structures of TSNIISK named after V.A. Koucherenko.

Results. Based on the experimental data, the normative and design load-bearing capacity, coefficients of stiffness and ductility for five types of CLT joints were established, depending on the number and direction of the outer layers, as well as the screw diameter. A plastic behavior rating scale was proposed to assess the performance of joints beyond elastic behavior, namely, a joint can be brittle, with low, moderate, or high plasticity.

Conclusions. The design features of CLT, such as the number of layers and their thickness, as well as the orientation of the outer layers, significantly influence the strength and deformation characteristics of screwed nodal CLT joints. The research results are intended for updating Rules and Regulations 299.13258800.2017 “Timber structures with screwed nodal joints.”

Keywords: cross-laminated timber, timber structures, nodal joints, screwed joints, strength, stress-strain behavior, ductility, load-bearing capacity, test methods

For citation: Salimullin A.R., Smirnov P.N. Development and research of screwed cross-laminated timber nodal joints for multi-storey buildings. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 53–64 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-53-64](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-53-64)

Author contribution statements

Smirnov P.N. – concept development, identification of key goals and objectives.

Salimullin A.R. – conducting research, including experimentation or data/evidence collection, data analysis and interpretation.

Funding

The research was supported by public funding.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Древесина перекрестноклееная (ДПК/CLT) является новым для России материалом, состоящим из ортогонально склеенных слоев из досок. ДПК/CLT позволяет строить здания из несущих деревянных панелей (стенные панели, плиты перекрытия и покрытия), в том числе многоэтажные.

Прочность и деформативность соединений панелей из ДПК/CLT играют важную роль в обеспечении прочности и жесткости несущего каркаса здания. Например, жесткость перекрытия, работающего в качестве диафрагмы, и стен здания при сопротивлении боковым нагрузкам зависит от конструктивных особенностей узловых соединений, используемых для их крепления. Расчет узловых соединений особенно важен в многоэтажных зданиях и при строительстве в районах с сейсмической активностью.

На сегодняшний день в сводах правил по деревянным конструкциям отсутствует методика расчета несущей способности узловых соединений ДПК/CLT на винтах, учитывающая особенности конструкции древесины перекрестноклееной, связанных с ортогональным расположением досок в слоях.

В Европе и Северной Америке проводились исследования узловых соединений ДПК/CLT. Результаты исследований приведены в работах [1–14].

Несмотря на большое количество исследований соединений ДПК/CLT, в европейских и североамериканских нормах проектирования отсутствуют данные в части пластической работы, коэффициентов запасов прочности и характера разрушения используемых соединений.

Цель и методика исследования

Целью работы являлось определение несущей способности, жесткости и пластичности узловых соединений ДПК/CLT с учетом конструктивных особенностей древесины перекрестноклееной.

Исследование выполнялось в соответствии с методикой, разработанной на основе ГОСТ 33082-2014 и анализе зарубежной научно-технической и нормативной базы [1–14].

Описание исследования

Исследования проводились на базе лаборатории несущих деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко при государственном финансировании.

В результате анализа мировой практики применения узловых соединений ДПК/CLT на винтах были определены основные типы используемых соединений.

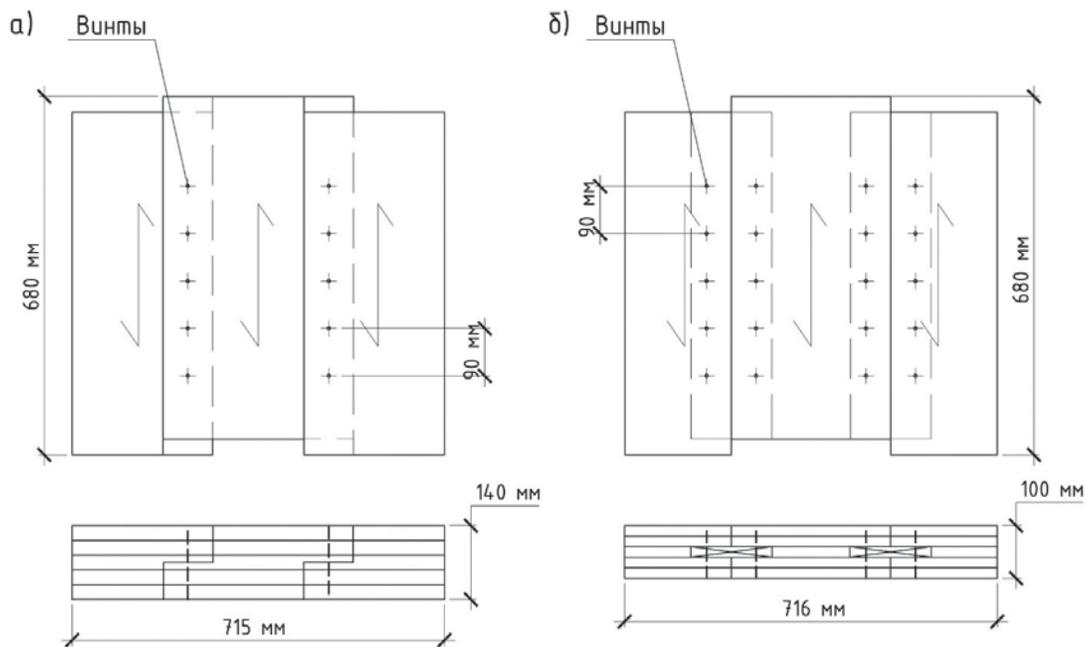


Рис. 1. Конструкция образцов узловых соединений типов «внахлест» (а) и «с прокладкой» (б)
Fig. 1. Design of overlap (a) and gasket-sealed (b) joints

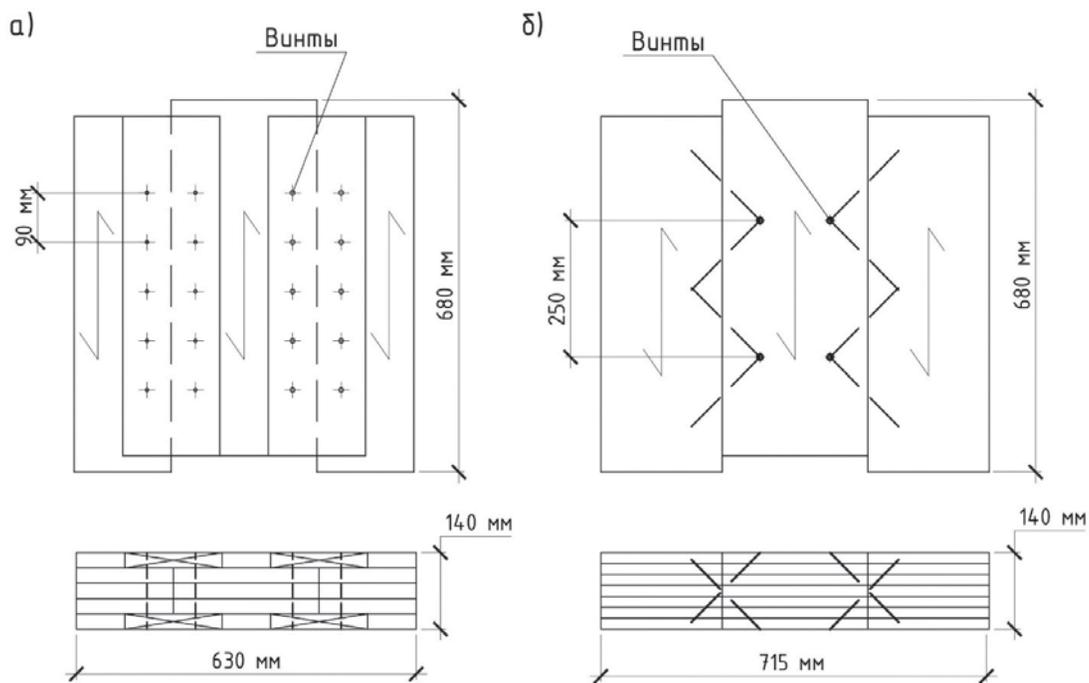


Рис. 2. Конструкция образцов соединений типов «с накладкой» (а) и «встык» (б)
Fig. 2. Design of strapped (a) and butt (b) joints

На основании установленных наиболее распространенных решений узловых соединений панелей ДПК/CLT были изготовлены серии образцов для их последующих испытаний с вариацией по количеству слоев и диаметру винтов.

Конструкции образцов для рассматриваемых типов соединений приведены на рис. 1–3.

В табл. 1 приведены параметры узловых соединений, для которых определялись характеристики прочности и деформативности.

Для образцов соединений типов «внахлест», «с прокладкой» и «с накладкой» использовались винты с неполной резьбой, в типах «встык» и «угловой» (с наклонными винтами) – винты с полной резьбой.

Проведены серии испытаний экспериментальных образцов, направленных на определение несущей способности и деформативности узловых соединений ДПК/CLT на винтах в соответствии с методикой исследований.

Испытания соединений проводили возрастающей нагрузкой с доведением образцов до разрушения. Нагрузку прикладывали ступенями (через равные ступени возрастания нагрузки) домкратом (5 т) с периодической разгрузкой с измерением полных деформаций и их разности на каждой ступени для определения предела упругой работы соединения. Величина ступени составляла 0,08–0,10 разрушающего усилия N_{max} . Приложение нагрузки на образец равными ступенями проводили с постоянной скоростью нагружения в пределах от 2 до 10 мм/мин.

В процессе нагружения фиксировали значения нагрузок и текущее время испытаний. Типовая диаграмма и обозначения фиксируемых величин при ступенчатом нагружении представлены на рис. 4.

Приборы для измерения осевых деформаций соединения устанавливались симметрично с обеих сторон образца по два индикатора на каждое место объединения элементов. Цена деления индикатора составляла 0,01 мм.

В процессе испытаний ступенчатой нагрузкой с разгрузкой (рис. 4) в журнале испытаний фиксировались: значения величины нагрузки на каждой ступени N , величины замера деформаций: полной d_{II} и остаточной d_0 за цикл; а также продолжительность времени t_1 возрастания нагрузки на каждой ступени и общая продолжительность испытаний t_{max} до момента разрушения образца.

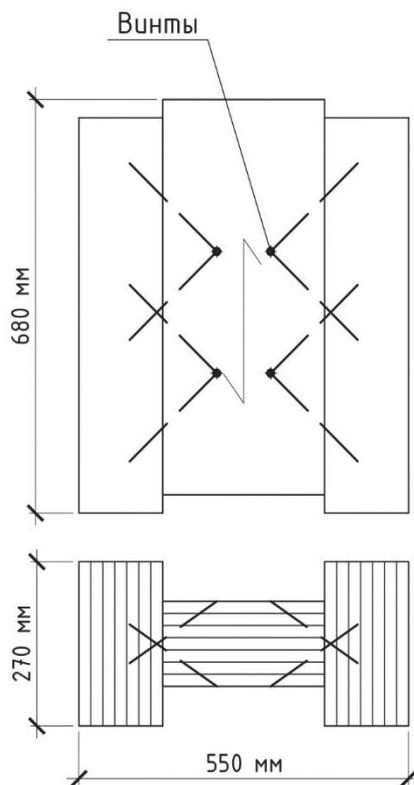


Рис. 3. Конструкция образцов узловых соединений типа «угловой»

Fig. 3. Design of halved corner joint

Таблица 1

Параметры образцов

Table 1

Sample parameters

№ серии	Тип соединения	Варьируемые параметры			
		параметры винтов		параметры CLT	
		диаметр, мм	длина, мм	кол-во слоев	толщина, мм
1-1	Внахлест	6	130	5	140
1-2				7	
2-1	С прокладкой	6	90	5	100
3-1	С накладкой	6	90	5	140
3-2		8	80		
4-1	Встык с наклонными винтами	7	240	7	140
4-2		9	260		
5-1	Угловой с наклонными винтами	7	240	7	140
5-2		9	260		
5-3		7	240	5	100
5-4				3	100
5-5		9	260	5	100
5-6				3	100

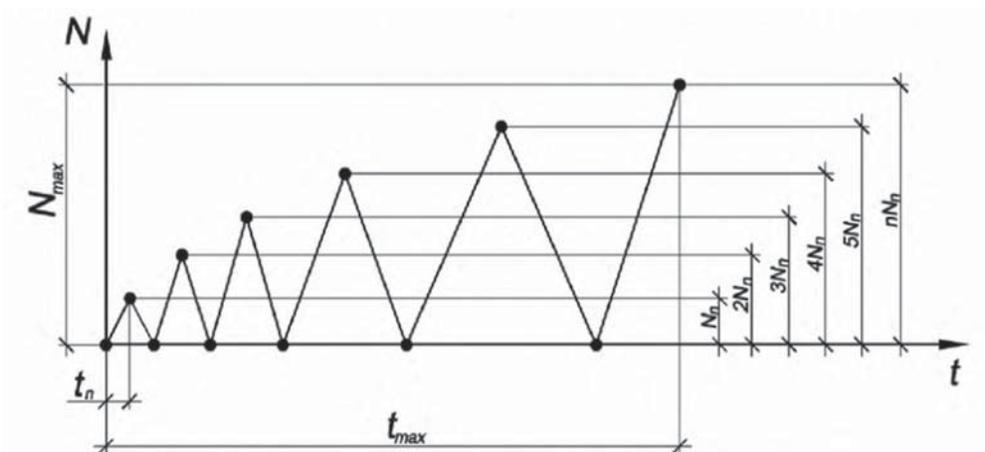


Рис. 4. Диаграмма ступенчатого нагружения образца с разгрузкой
 Fig. 4. Profile of sample stepwise loading with unloading

Испытательный стенд для образцов узловых соединений типов «с прокладкой» и «угловой» изображен на рис. 5.



Рис. 5. Испытательный стенд для образцов узловых соединений типов «с прокладкой» (а) и «угловой» (б)
 Fig. 5. Test bench for gasket-sealed (a) and halved corner (b) joints

Анализ результатов

На основании результатов проведенных экспериментальных исследований были определены нормативные значения прочности и деформативности несущей способности и жесткости узловых соединений ДПК/CLT на винтах.

Жесткость соединений определялась в соответствии с EN 26891 «Timber structures, joints made with mechanical fasteners, general principles for the determination of strength and deformation characteristics» для диапазона кривых нагрузки–смещения между 10 и 40 % от максимальной нагрузки.

Коэффициент пластичности μ рассчитывался как отношение между деформациями сдвига при максимальной нагрузке, d_{max} , и деформациями при пределе упругой работы, d_y , для сравнения испытанных типов соединений с различным деформированием при нагрузке.

Шкала оценки пластичности соединений, предложенная Smith с соавт. [15], использовалась для классификации работы соединений ДПК/CLT на винтах под нагрузкой: хрупкое ($\mu \leq 2$), низкая пластичность ($2 \leq \mu \leq 4$), умеренная пластичность ($4 \leq \mu \leq 6$) и высокая пластичность ($\mu > 6$).

Систематизированные данные прочностных и деформационных характеристик узловых соединений ДПК/CLT «внахлест», «с прокладкой» и «с накладкой» приведены в табл. 2.

Из табл. 2 видно, что для узловых соединений «внахлест» семислойных панелей толщиной 140 мм (7×20 мм) с поперечно нагруженными винтами диаметром 6 мм, длиной 130

Таблица 2

Анализ результатов испытаний узловых соединений ДПК/CLT «внахлест», «с прокладкой», «с накладкой»

Table 2

Test data analysis of overlap, gasket-sealed, and strapped CLT joints

Тип соединения	№ серии	Разрушающая нагрузка, нормативная прочность, нагрузка для границы упругой работы, несущая способность, кН								Деформации соединения, мм		μ	Жесткость K , кН/мм	
		для соединения				на 1 срез винта				d_{max}	d_e		на 1 срез винта	для соединения
		N_{max}	R_n	N_e	R_d	N_{max}	R_n	N_e	R_d					
«внахлест»	1-1	23,1	15,5	13,5	9,8	4,62	3,10	2,70	1,96	24,94	5,92	4,2	0,46	2,28
	1-2	28,1	18,9	15,9	11,5	5,62	3,78	3,18	2,30	20,73	7,49	2,8	0,42	2,12
«с прокладкой»	2-1	34,6	23,2	17,6	12,8	3,46	2,32	1,76	1,28	15,3	3,80	4,0	0,46	4,63
«с накладкой»	3-1	33,4	22,8	18,5	13,7	3,34	2,28	1,85	1,37	23,35	6,86	3,4	0,27	2,70
	3-2	40,8	27,8	23,3	17,2	4,08	2,78	2,33	1,72	20,99	8,12	2,6	0,29	2,87

мм с неполной резьбой расчетная несущая способность на 18 % превысила аналогичный показатель для узловых соединений пятислойных панелей толщиной 140 мм (5 × 28 мм). Полученные коэффициенты жесткости для этого типа соединений 2,28 и 2,12 кН/мм для семислойных и пятислойных панелей, соответственно, не выявили значительного влияния количества слоев на жесткость узловых соединений. При этом для узловых соединений семислойных панелей был отмечен в 1,5 раза более высокий коэффициент пластичности по сравнению с узловыми соединениями пятислойных панелей. По предложенной в работе [15] шкале пластичности соединения семислойных панелей можно отнести к соединениям с умеренной пластичностью, а соединения пятислойных панелей – к соединениям с низкой пластичностью.

Для узловых соединений пятислойных панелей толщиной 100 мм (5 × 20 мм) «с прокладкой» расчетная несущая способность на один срез винта Ø6 мм оказалась в 1,5 раза ниже, чем для пятислойных панелей «внахлест» толщиной 140 мм (5 × 28 мм) из-за меньшей «рабочей» длины винтов. При этом расчетная несущая способность узлового соединения при одинаковом количестве винтов оказалась на 30 % выше из-за наличия двух плоскостей условного среза для соединений «с прокладкой».

Жесткость узловых соединений «с прокладкой» оказалась в 2 раза выше, чем для узловых соединений «внахлест» при одинаковом диаметре и количестве винтов. Коэффициент пластичности $\mu = 4$ для этих соединений соответствует показателю умеренной пластичности.

Расчетная несущая способность узловых соединений «с накладкой» на один условный срез винта $\varnothing 6$ мм составила 1,37 кН, что соответствовало несущей способности соединений «с прокладкой». Полученная жесткость и пластичность для соединений «с накладкой» с винтами $\varnothing 6$ мм также соответствовала узловым соединениям «с прокладкой», но для узловых соединений «с накладкой» было использовано в два раза больше винтов.

Для узловых соединений «с накладкой» с винтами $\varnothing 8$ мм установленная расчетная несущая способность на 25 % превысила аналогичный показатель для соединений с винтами $\varnothing 6$ мм при сопоставимых значениях коэффициентов жесткости для этих соединений.

Систематизированные данные прочностных и деформационных характеристик узловых соединений ДПК/CLT «встык» и «угловой» приведены в табл. 3.

Из табл. 3 видно, что для узловых соединений типа «встык» пятислойных панелей толщиной 140 мм (5×28 мм) с парами перекрестно расположенных винтов $\varnothing 9$ мм длиной 260 мм с резьбой по всей длине несущая способность более чем 1,5 раза выше, чем для аналогичных узловых соединений с винтами $\varnothing 7$ мм длиной 240 мм. Коэффициент жесткости K для узловых соединений с винтами $\varnothing 9$ мм приблизительно на 40 % выше, при этом коэффициент пластичности μ для этих соединений снижается более чем на 60 % в сравнении с узловыми соединениями с винтами $\varnothing 7$ мм.

Расчетная несущая способность узловых соединений типа «угловой» с двумя парами перекрестно расположенных винтов $\varnothing 7$ мм длиной 240 мм для семислойных панелей толщиной 140 мм (7×20 мм) составила 6,44 кН, что ниже, чем для аналогичных соединений пятислойных панелей толщиной 140 мм (5×28 мм) и трехслойных панелей толщиной 100 мм ($40 \times 20 \times 40$ мм) приблизительно на 17 и 12 % соответственно. Для узловых соединений пятислойных панелей и трехслойных панелей жесткость также оказалась выше на 13–14 %. Коэффициент пластичности в зависимости от количества слоев ДПК/CLT менялся незначительно от 4,2 до 4,6, что свидетельствует об умеренной пластичности соединений данного типа с винтами $\varnothing 7$ мм.

Расчетные значения несущей способности для узловых соединений «угловой» семислойных (7×20 мм) и пятислойных (5×28 мм) панелей с двумя парами перекрестно расположенных винтов $\varnothing 9$ мм оказались сопоставимыми 9,15 и 9,07 кН соответственно. Для соединений пятислойных панелей с винтами $\varnothing 9$ мм было отмечено на 25 % более высокое значение коэффициента жесткости и на 56 % коэффициента пластичности в сравнении с соединениями семислойных панелей. Полученные результаты коэффициента пластичности 5,3 для пятислойных панелей и 3,4 для семислойных панелей относят эти соединения к разным группам пластичности – умеренно пластичные и низко пластичные соответственно.

По результатам оценки несущей способности для узловых соединений семислойных панелей типа «угловой» было отмечено значительное влияние диаметра винтов на расчетную несущую способность, коэффициенты жесткости и пластичности соединений. Несущая способность соединений с винтами $\varnothing 9$ мм на 42 % превысила несущую способность соединений с винтами $\varnothing 7$ мм. Жесткость соединений при увеличении диаметра винтов возросла на 54 %, пластичность при этом снизилась на 24 %.

Для соединений типа «угловой» трехслойных панелей с поперечным ориентированием внешних слоев в среднем элементе с винтами $\varnothing 9$ мм расчетная несущая способность составила 8,74 кН. Для этих соединений был отмечен самый высокий коэффициент жесткости 8,18. Установленный коэффициент $\mu = 4,7$ для данного типа соединений свидетельствует об их умеренной пластичности.

Таблица 3

Анализ результатов испытаний узловых соединений ДПК/CLT «встык» и «угловой»

Table 3

Test data analysis of butt and halved corner CLT joints

Тип соединения	№ серии	Разрушающая нагрузка, нормативная прочность, несущая способность, кН						Деформации соединения, мм		μ	Жесткость K, кН/мм	
		для соединения			на 1 пару винтов			d_{max}	d_d		1 пары винтов	для соединения
		N_{max}	R_n	R_d	N_{max}	R_n	R_d					
«встык»	4-1	27,8	18,6	11,8	13,89	9,29	5,91	10,16	1,63	6,2	3,77	7,54
	4-2	42,8	28,8	18,3	21,38	14,41	9,17	7,41	1,95	3,8	5,35	10,69
«угловой»	5-1	30,4	20,2	12,9	15,19	10,12	6,44	6,58	1,58	4,2	4,08	8,17
	5-2	43,0	28,8	18,3	21,50	14,38	9,15	6,03	1,75	3,4	6,08	12,16
	5-3	35,3	23,6	15,0	17,65	11,82	7,52	7,28	1,70	4,3	4,66	9,32
	5-4	33,9	22,7	14,4	16,93	11,32	7,20	8,52	1,87	4,6	4,61	9,21
	5-5	42,6	28,5	18,1	21,31	14,26	9,07	6,43	1,22	5,3	7,64	15,27
	5-6	41,2	27,5	17,5	20,57	13,74	8,74	5,19	1,11	4,7	8,18	16,35

Из табл. 2 и 3 видно, что полученные результаты исследований продемонстрировали влияние диаметра винтов и количества слоев ДПК/CLT на несущую способность.

Для узловых соединений «встык» и «угловой» была получена относительно высокая жесткость от 7,54 до 16,35 кН/мм на одно соединение (две пары перекрестных винтов). Для соединений с поперечно нагруженными винтами максимальная зафиксированная жесткость оказалась для соединений «с прокладкой» 4,5 кН/мм. Для соединений «внахлест» и «с накладкой» были отмечены самые низкие показатели жесткости – 2–3 кН/мм на одно соединение (пять винтов).

Для узловых соединений типа «внахлест», «с прокладкой» и «с накладкой» с винтами, нагруженными в основном поперечной силой, коэффициент пластичности μ составлял от 2,6 до 4,2, что характеризовало их как соединения с низкой или умеренной пластичностью. Коэффициент пластичности для узловых соединений типа «встык» и «угловой» с винтами, загруженными в поперечном и осевом направлении, составил от 4,2 до 6,2, что соответствует умеренной или высокой пластичности. При этом для двух серий соединений семислойных панелей «встык» и «угловой» с винтами Ø9 мм были отмечены низкие значения коэффициента пластичности $\mu < 4$.

Пластический характер разрушения для типов соединений «внахлест», «с прокладкой» и «с накладкой» с поперечно нагруженными винтами независимо от диаметра винтов (Ø6 и Ø8 мм) не приводил к разрушению деревянных элементов. Только в одном образце для соединения типа «с накладкой» было зафиксировано разрушение от раскалывания накладки по оси винтов. При этом для соединений с поперечно нагруженными винтами

при разрушении наблюдался значительный изгиб крепежных элементов и смятие древесины в отверстии шурупов в направлении действия силы.

Для соединений на винтах «встык» и «угловой» с осевой и боковой нагрузкой раскалывание панелей ДПК/CLT не наблюдалось. Разрушение происходило от вдавливания в древесину винта, работающего на растяжение и сдвиг, и выдергивания винта, работающего на сжатие и сдвиг. Механизм разрушения, наблюдаемый для этих соединений, характеризовался образованием пластических шарниров в винтах. При испытаниях на сдвиг соединения демонстрировали вращение из плоскости в направлении сжатых винтов, при этом наблюдался пластичный характер работы без разрыва винтов или разрушения от раскалывания древесины.

При испытаниях соединений типа «внахлест», «с прокладкой» и «с накладкой» при больших деформациях наблюдался чистый сдвиг без поворотов из плоскости.

Заключение

Результаты анализа и обработки экспериментальных данных прочностных и деформационных характеристик соединений ДПК/CLT на винтах позволяют сделать следующие выводы:

- полученные в ходе исследований экспериментальные данные позволили установить нормативную прочность, расчетную несущую способность, деформативность, жесткость и показатель пластичности для основных пяти типов узловых соединений ДПК/CLT на винтах: «внахлест», «с прокладкой», «с накладкой», «встык» и «угловой»;

- конструктивные особенности ДПК/CLT, такие как количество слоев, их толщина, а также ориентация внешних слоев оказывают существенное влияние на прочностные и деформационные характеристики узловых соединений ДПК/CLT на винтах;

- нормативная прочность, несущая способность, жесткость и показатель пластичности для узловых соединений в значительной степени зависят от диаметра винтов, используемых для соединений;

- узловые соединения «внахлест», «с прокладкой» и «накладкой» пятислойных и семислойных панелей с поперечно нагруженными винтами диаметром 7 мм показали самую низкую расчетную несущую способность 10–14 кН. Применение винтов диаметром 9 мм позволяет увеличить расчетную несущую способность этого типа соединений в среднем на 20 %;

- установленные значения расчетной несущей способности узловых соединений «встык» и «угловой» со скрещенными винтами, работающими на поперечные и осевые нагрузки, получились сопоставимыми с соединениями с поперечно нагруженными винтами;

- жесткость узловых соединений ДПК/CLT «встык» и «угловой» со скрещенными винтами, работающими на поперечные и осевые нагрузки, значительно (в 2–4 раза) выше, чем для соединений с поперечно нагруженными винтами;

- установленные коэффициенты пластичности для узловых соединений ДПК/CLT «внахлест», «с прокладкой» и «накладкой» с поперечно нагруженными винтами позволили отнести их к соединениям с низкой или умеренной пластичностью;

- для узловых соединений ДПК/CLT «встык» и «угловой» со скрещенными винтами, работающими на поперечные и осевые нагрузки, были определены коэффициенты пластичности, соответствующие умеренной или высокой пластичности.

Результаты исследований предполагается использовать при актуализации СП 299.13258800.2017 «Конструкции деревянные с узлами на винтах».

Список литературы / References

1. Ceccotti A., Lauriola M.P., Pinna M., Sandhaas C. SOFIE project – Cyclic tests on crosslaminated wooden panels. In: Proc. 9th World Conf. Timber Eng. (WCTE 2006), Portland, Oregon, USA; 2006. p. 805–12.
2. Gavric I., Fragiaco M., Ceccotti A. Cyclic behavior of typical screwed connections for cross-laminated (CLT) structures. Eur J Wood Wood Prod. 2015;73. <https://doi.org/10.1007/s00107-014-0877-6>.
3. Ceccotti A., Sandhaas C., Okabe M., Yasumura M., Minowa C., Kawai N. SOFIE project – 3D shaking table test on a seven-storey full-scale cross-laminated timber building. Earthq Eng Struct Dyn. 2013;42:2003–21. <https://doi.org/10.1002/eqe.2309>.
4. Gavric I., Fragiaco M., Ceccotti A. Cyclic behavior of CLT wall systems: experimental tests and analytical prediction models. J Struct Eng. 2015;141:1–14. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)ST.1943-541X.0001246](https://doi.org/10.1061/(ASCE)ST.1943-541X.0001246).
5. Gavric I., Fragiaco M., Ceccotti A. Cyclic behaviour of typical metal connectors for cross-laminated (CLT) structures. Mater Struct. 2014. <https://doi.org/10.1617/s11527-014-0278-7>.
6. Tomasi R., Crosatti A., Piazza M. Theoretical and experimental analysis of timber-to timber joints connected with inclined screws. Constr Build Mater. 2010;24:1560–71. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.03.007>.
7. Jensen J.L., Nakatani M., Quenneville P., Walford B. A simplified model for withdrawal of screws from end-grain of timber. Constr Build Mater. 2012;29:557–63. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.10.066>.
8. Ringhofer A., Brandner R., Schickhofer G. Withdrawal resistance of self-tapping screws in unidirectional and orthogonal layered timber products. Mater Struct. 2013;48. <https://doi.org/10.1617/s11527-013-0244-9>.
9. Dietsch P., Brandner R. Self-tapping screws and threaded rods as reinforcement for structural timber elements – a state-of-the-art report. Constr Build Mater. 2015;97:78–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.04.028>.
10. Ringhofer A., Brandner R., Schickhofer G. A universal approach for withdrawal properties of self-tapping screws in solid timber and laminated timber products. In: Proc. Int. Netw. Timber Eng. Res. Pap. 48-07-01, Sibenik, Croatia; 2015. p. 79–95.
11. Stamatopoulos H., Malo K.A. Withdrawal capacity of threaded rods embedded in timber elements. Constr Build Mater. 2016;116:263–72. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.04.144>.
12. Hossain A., Popovski M., Tannert T. Cross-laminated timber connections assembled with a combination of screws in withdrawal and screws in shear. Eng Struct. 2018;168:1–11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.04.052>.
13. Ringhofer A., Brandner R., Blaß H.J. Cross laminated timber (CLT): design approaches for dowel-type fasteners and connections. Eng Struct. 2018;171:849–61. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.05.032>.
14. Ringhofer A. Axially loaded self-tapping screws in solid timber and laminated timber products PhD Thesis Graz University of Technology; 2017.
15. Joyce T., Ballerini M., Smith I. Mechanical behaviour of in-plane shear connections between CLT wall panels. In: The 44th CIB Working Commission W18 – Timber Structures, Alghero, Italy, 29 August–01 September; 2011.

Информация об авторах / Information about the authors

Айдар Рустемович Салимуллин✉, бакалавр технических наук, инженер лаборатории несущих деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», студент магистратуры по направлению «Промышленное и гражданское строительство» НИУ МГСУ, Москва
e-mail: aidarslm11@mail.ru

Aidar R. Salimullin✉, B. Sci. (Engineering), Engineer, Laboratory of Timber Structures of TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Master's degree student in the direction of "Industrial and Civil Engineering", National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: aidarslm11@mail.ru

Павел Николаевич Смирнов, канд. техн. наук, заведующий лабораторией несущих деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: spair23@list.ru

Pavel N. Smirnov, Cand. Sci. (Engineering), Laboratory Chief, Laboratory of Timber Structures of TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: spair23@list.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 620.193

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-65-81](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-65-81)

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ НА ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ШТИФТОВОГО СОЕДИНЕНИЯ LEIMET ABB+ 400 ДЛЯ СОСТАВНЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ СВАЙ

В.Ф. СТЕПАНОВА¹, д-р. техн. наук

А.В. БУЧКИН¹, канд. техн. наук

К.Л. КУДЯКОВ^{1,2}, канд. техн. наук

Н.А. МОИСЕЕВА¹

¹Научно-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

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

Аннотация

Введение. Применение штифтового соединения Leimet ABB+ 400 является перспективным и технологичным методом стыкования секций составных железобетонных свай. Вопросы устройства коррозионной защиты и прогнозирования срока эксплуатации для данного типа соединений изучены недостаточно.

Целью исследований являлось определение качественных и количественных параметров коррозионного повреждения элементов штифтового соединения в условиях воздействия заданной жидкой агрессивной среды при различных методах их коррозионной защиты.

Материалы и методы. В качестве опытных образцов приняты фрагменты стыка секций сборных железобетонных свай со штифтовым соединением Leimet ABB+ 400. Рассмотрены 3 серии опытных образцов, отличающиеся методами коррозионной защиты: полностью без защиты; совместная гальванизация забивных штифтов и обработка элементов замка ингибированной смазкой на литиевой основе; выборочное нанесение битумной холодной мастики. Была разработана и реализована программа ускоренных коррозионных испытаний по ГОСТ Р 9.905-2007, которая включала в себя 2 режима испытаний: постоянная выдержка на весь период испытаний образцов в 5 % водном растворе хлорида натрия; циклы выдержки образцов в 5 % водном растворе хлорида натрия в течение 8 часов и в условиях воздушной среды в течение 16 часов.

Результаты. По окончании ускоренных коррозионных испытаний выполнена количественная и качественная оценка коррозионных повреждений элементов штифтового соединения Leimet ABB+ 400, приведены результаты прогнозирования их ориентировочного срока эксплуатации по условным критериям. Выявлены элементы штифтового соединения, подверженные коррозионному повреждению при воздействии жидкой агрессивной среды.

Выводы. В рамках исследования выявлен наиболее эффективный способ антикоррозионной защиты штифтового соединения Leimet ABB+ 400, а именно совместная гальванизация забивных штифтов и обработка элементов замка ингибированной смазкой на литиевой основе. По окончании ускоренных коррозионных испытаний обработанные данным методом образцы не имели признаков коррозионного повреждения. Данный метод позволяет обеспечить условный срок эксплуатации штифтового соединения в условиях воздействия сильноагрессивной жидкой среды на срок, значительно превышающий 25 лет, однако требуются дальнейшие уточняющие исследования данного вопроса.

Ключевые слова: штифтовое соединение Leimet ABB+, железобетонные сваи, антикоррозионная защита, ускоренные коррозионные испытания

Для цитирования: Степанова В.Ф., Бучкин А.В., Кудяков К.Л., Моисеева Н.А. Оценка влияния агрессивной среды на долговечность штифтового соединения Leimet ABB+ 400 для составных железобетонных свай // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 65–81. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-65-81](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-65-81)

Вклад авторов

Степанова В.Ф. – общее руководство работой, назначение параметров ускоренных коррозионных испытаний, прогнозирование ориентировочного срока эксплуатации штифтовых соединений, редактирование чернового варианта статьи.

Бучкин А.В. – разработка, организация и реализация программы испытаний, редактирование чернового варианта статьи.

Кудяков К.Л. – разработка, организация и реализация программы испытаний, обработка и анализ результатов, подготовка чернового варианта статьи.

Моисеева Н.А. – реализация ускоренных коррозионных испытаний, обработка и анализ результатов, подготовка чернового варианта статьи.

Финансирование

Исследование выполнено в рамках договорных работ АО «НИЦ «Строительство».

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

EVALUATION OF THE CORROSIVE EFFECT ON THE DURABILITY OF THE LEIMET ABB+ 400 PILE JOINT FOR PRECAST REINFORCED CONCRETE PILES

V.F. STEPANOVA¹, Dr. Sci. (Engineering)
A.V. BUCHKIN¹, Cand. Sci. (Engineering)
K.L. KUDYAKOV^{1,2✉}, Cand. Sci. (Engineering)
N.A. MOISEEVA¹

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

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

Abstract

Introduction. The application of the Leimet ABB+ 400 pile joint appears to be a promising and technologically effective method of the connecting the sections of precast reinforced concrete piles. Currently, the issues of corrosion protection measures and service life forecasting for this type of joints are understudied.

Aim. The aim of the research involves the determination of the qualitative and quantitative parameters of corrosion damage to the pin joint elements affected by the specified liquid corrosive under various methods of corrosion protection.

Methods and materials. The studied samples included fragments of the Leimet ABB+ 400 pile joint between the sections of precast reinforced concrete piles. Three series of samples differing by the methods of corrosion protection were considered, including completely unprotected, with the galvanization of locking dowels combined with lubrication of locking elements by lithium-based inhibited grease, as well as with the selective application of bituminous cold mastic. The program of accelerated corrosion tests according to the GOST R 9.905-2007 was developed and implemented. The following two testing modes were included in the program: permanent exposure of the samples to 5 % sodium chloride water solution for the entire testing period; 8- and 16-hour cycles of exposing samples to 5 % sodium chloride water solution and to the air, respectively.

Results. Based on the results of accelerated corrosion tests, the quantitative and qualitative evaluation of the corrosive damage to the elements of the Leimet ABB+ 400 pile joint was performed. The results of forecasting their service life according to the conditional criteria are provided. The pin joint elements susceptible to the corrosion in a liquid corrosive medium were identified.

Conclusions. In the framework of the study, the most effective way of anti-corrosion protection of the Leimet ABB+ 400 pile joint was identified as the galvanization of the locking dowels combined with lubrication of the locking elements by the inhibited lithium-based grease. At the end of accelerated corrosion tests, the samples protected according to this method demonstrated no signs of corrosion damage. This method is applicable for ensuring the conditional service life of the pin connection under the exposure to highly aggressive liquid medium during the period considerably exceeding 25 years. Nevertheless, further refining studies of this issue are required.

Keywords: Leimet ABB+ pile joint, reinforced concrete piles, corrosion protection, accelerated corrosion tests

For citation: Stepanova V.F., Buchkin A.V., Kudyakov K.L., Moiseeva N.A. Evaluation of the corrosive effect on the durability of the Leimet ABB+ 400 pile joint for precast reinforced concrete piles. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 65–81 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-65-81](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-65-81)

Author contribution statements

Stepanova V.F. – general management, assignment of accelerated corrosion test parameters, forecast of the approximate service life of pile joints, article draft editing.

Buchkin A.V. – development, organization and implementation of the test program, article draft editing.

Kudyakov K.L. – development, organization and implementation of the test program, processing and analysis of the results, article draft preparation.

Moiseeva N.A. – conduct of accelerated corrosion tests, processing and analysis of the results, article draft preparation.

Funding

The study was carried out within the framework of contractual works of JSC Research Center of Construction.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Штифтовое соединение Leimet ABB+ является перспективной технологией стыкования секций составных железобетонных свай, в т. ч. в условиях холодного климата: данная технология обуславливает значительное снижение затрат времени на устройство стыка и не требует применения сварочного оборудования, растворов, составов холодного отверждения.

Данная технология достаточно широко охватывает зарубежный строительных рынок (Швеция, Дания, Норвегия и пр.), и начинает применяться на российских строительных

объектах (Калининград, Воронеж, Санкт-Петербург и пр.). В [3–6] представлены некоторые результаты исследований и опыт применения рассматриваемых штифтовых соединений составных железобетонных свай, где отмечается перспективность применения данной технологии. Однако в доступных источниках не обнаружены сведения о расчетной или экспериментальной оценке коррозионной стойкости штифтовых соединений, в т. ч. для соединения типа Leimet ABB+. Принципиальная конструкция штифтового соединения Leimet ABB+ приведена на рис. 1.

Для антикоррозионной защиты металлических элементов данного штифтового соединения в соответствии с ТУ 25.11.23-001-92894761-2018 «Соединение штифтовое для свай. Технические условия» [7] производитель рекомендует применять способ гальванизации штифтов и обработки элементов замков многоцелевой ингибированной смазкой на литиевой основе типа «Teboil». Данный способ защиты для исследуемых конструкций при воздействии агрессивных сред в СП 28.13330.2017 [2] не предусмотрен. Также имеются трудности в назначении требований к антикоррозионной защите, обусловленные особенностью конструкции данного штифтового соединения (см. рис. 1).

Цель

Цели настоящего исследования заключались в следующем:

- определить, какие элементы штифтового соединения подвержены коррозионным процессам при воздействии агрессивной среды;
- установить, позволяют ли методы, рекомендуемые производителем, обеспечить его коррозионную защиту при действии агрессивной среды;

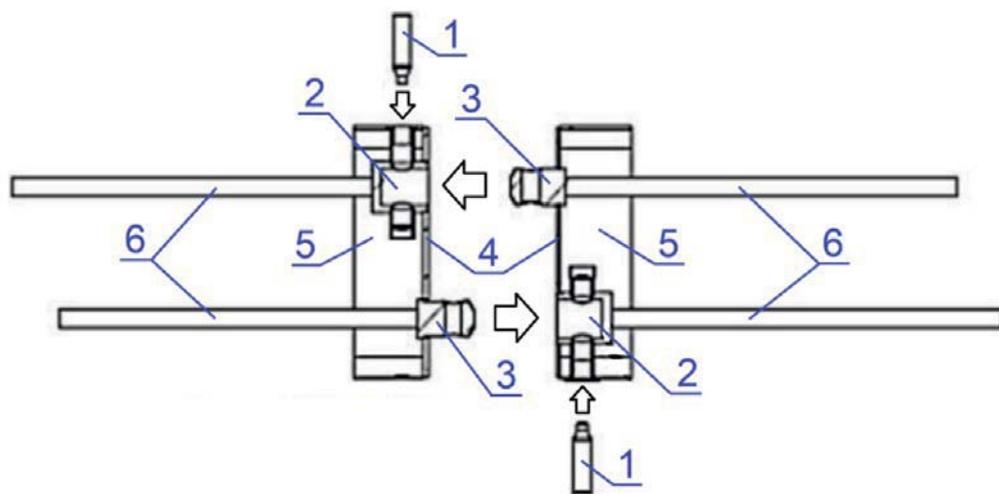


Рис. 1. Принципиальная конструкция штифтового соединения Leimet ABB+:

- 1 – забивной штифт; 2 и 3 – элементы замка: фиксирующий паз и фиксирующий штырь соответственно;
4 – торцевая пластина; 5 – обечайка, устроенная по всему контуру торцевой пластины;
6 – анкерные выпуски, приваренные к элементам замка

Fig. 1. Conceptual design of the Leimet ABB+ pile joint: 1 – locking pin; 2, 3 – locking elements: locking block and locking dowel, respectively; 4 – end plate; 5 – shell along the entire contour of the end plate; 6 – anchor bars welded to lock elements

- установить, позволяет ли альтернативный метод (нанесение битумной мастики на металлические элементы штифтового соединения в момент его сборки) обеспечить его коррозионную защиту при действии агрессивной среды;
- установить пригодность применения штифтового соединения Leimet ABB+ 400 для стыкования сборных железобетонных свай в условиях воздействия среднеагрессивной и сильноагрессивной среды грунта и грунтовых вод по СП 28.13330.2017 при расчетном сроке службы возводимого сооружения 25 лет.

Материалы и методы

Ускоренные коррозионные испытания проводились в лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкции НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» с участием испытательного центра АО «НИЦ «Строительство» в соответствии с разработанной Программой исследований, согласно которой были изготовлены специальные опытные образцы (см. рис. 2), каждый из которых представлял собой стык двух натуральных фрагментов железобетонных свай с сечением 400×400 мм, выполненный с помощью металлического штифтового соединения Leimet ABB+ 400 по [7].

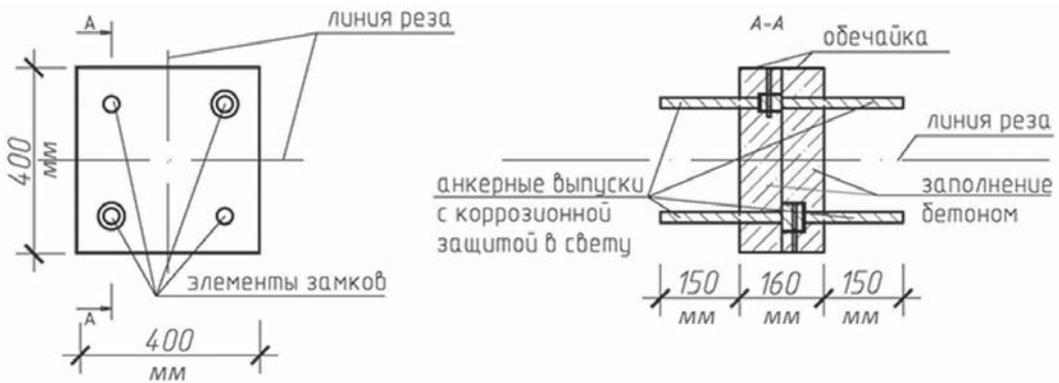


Рис. 2. Принципиальная конструкция опытных образцов для коррозионных испытаний
Fig. 2. Conceptual design of corrosion test samples



Рис. 3. Принципиальная конструкция фрагмента опытного образца и схема приложения растягивающей нагрузки
Fig. 3. Conceptual design of the tested sample fragment and the scheme of the tensile load application



а **б**

Рис. 4. Общие виды опытного образца до распиловки (а) и его фрагмента, образованного после распиловки (б)
Fig. 4. General views of (a) the tested sample prior sawing and (b) sawed fragment

По завершении ускоренных коррозионных испытаний была произведена механическая распиловка опытных образцов по линиям реза (рис. 2) с образованием четырех фрагментов. Для каждого опытного образца по 2 шт. образованных фрагментов подвергались поэлементной разборке с визуально-инструментальным осмотром каждого элемента штифтового соединения, остальные 2 шт. испытывались на разрывной машине с оценкой разрушающей нагрузки и характера их разрушения (рис. 3). Общие виды опытного образца (до распиловки) и его фрагмента (после распиловки) приведены на рис. 4.

В настоящей работе ускоренные коррозионные испытания опытных образцов штифтового соединения Leimet АВВ+ выполнены в водном растворе 5 % хлорида натрия, который по отношению к углеродной стали соответствует сильноагрессивной среде по таблице Х5 СП 28.13330.2017 и характеристикам подземных вод предполагаемой площадки строительства по водородному показателю рН от 3 до 5. Продолжительность коррозионных испытаний принята в соответствии с ГОСТ Р 9.905-2007 [1] и составила 240, 720, 2160 ч.

Ускоренные коррозионные испытания опытных образцов с учетом обозначенных параметров агрессивной среды выполнены в течение трех месяцев (апрель–июнь 2021 г.) при комнатной температуре 20 ± 2 °С по двум режимам испытаний (табл. 1):

- режим № 1 – полное погружение в растворе 5 % хлорида натрия;
- режим № 2 – полное погружение в растворе 5 % хлорида натрия в течение 8 ч, изъятие и выдержка в течение 16 ч в условиях воздушной среды, циклично.

В течение всего срока испытаний для каждого образца выдержка в жидкой и воздушной средах производилась без изменения положения и ориентации его граней. Контрольный образец не подвергался воздействиям обозначенных агрессивных сред. Количество опытных образцов принято по 1 шт. на каждую вариацию (табл. 1).

Таблица 1

Программа ускоренных коррозионных испытаний опытных образцов

Table 1

Program of accelerated corrosion tests of the samples

Серии опытных образцов	Режимы испытаний и их продолжительность, ч (суток)						
	контрольный образец	режим № 1			режим № 2		
		0	240 (10)	720 (30)	2160 (90)	240 (10)	720 (30)
Серия 1 (без коррозионной защиты)	+	+	+	+	+	+	+
Серия 2 (гальванизация штифтов и применение многоцелевой ингибированной смазки на литиевой основе типа «Teboil»)	-	-	+	+	-	+	+
Серия 3 (с нанесением битумной холодной мастики типа «AquaMast» на торцевые пластины)	-	-	-	+	-	-	+

Анализ результатов ускоренных коррозионных испытаний проводился в соответствии с п. 10.1 ГОСТ Р 9.905-2007 [1] и включал в себя оценку следующих критериев:

- изменение внешнего вида образца во время испытания;
- характер, количество и распределение коррозионных дефектов;
- изменение геометрических размеров элементов (толщины и пр.).

Возможное влияние коррозионных повреждений на механические свойства (прочность) штифтового соединения оценивалось путем испытаний на разрывной машине Instron 1000HDX с приложением растягивающей нагрузки к арматурным выпускам фрагментов опытных образцов (вдоль условной оси центра тяжести одиночного штифтового соединения), при этом оценивалась разрушающая нагрузка и характер разрушения опытной модели. Принципиальная схема испытаний приведена на рис. 2.

Разрушение всех фрагментов опытных образцов происходило с образованием зоны пластической деформации в анкерном выпуске с последующим его разрывом. В исследуемых опытных моделях анкерные выпуски выполнены из арматуры класса А500С Ø 25 мм, соединенные с замковыми элементами штифтового соединения при помощи сварки встык без разделки швов. Разрушений непосредственно элементов штифтового соединения не зафиксировано.

После испытаний выполнена разборка фрагментов опытных образцов на отдельные элементы (рис. 5) с их последующим осмотром, в результате которого зафиксировано отсутствие видимых повреждений элементов замка штифтового соединения; забивной штифт имеет локальные деформации (искривление) без видимых характерных признаков разрушения металла. Данная схема разрушения характерна для всех испытанных фрагментов опытных образцов.



Рис. 5. Общий вид элементов штифтового соединения после испытаний на разрыв (в разобранном виде) и характерная схема его разрушения при действии осевой растягивающей нагрузки
Fig. 5. General view of pin joint elements after tensile tests (disassembled) and the characteristic diagram of the pin joint destruction under the effect of the axial tensile load

Результаты

Полученные результаты могут свидетельствовать о механической надежности элементов штифтового соединения Leimet ABB+, подверженного воздействию агрессивной среды в рассматриваемых в настоящей работе условиях. При этом отказ силовой системы «анкерный выпуск А500С Ø 25 мм–замок–штифт» происходил в результате разрыва анкерных выпусков при средней нагрузке 308,7 кН (коэффициент вариации 5,1 %).

По результатам внешнего осмотра разобранных фрагментов опытных образцов после ускоренных коррозионных испытаний установлено следующее.

Для всех образцов наиболее интенсивное развитие коррозии наблюдается при режиме испытаний «жидкая среда–воздушная среда» (режим № 2): ускорение процессов коррозии при нахождении образца на воздухе происходит за счет интенсивного окисляющего действия кислорода и наличия на поверхности элементов соединения пленки жидкой агрессивной среды, содержащей хлорид-ионы.

Внутренние поверхности металлических элементов штифтового соединения, которые имели непосредственный контакт с бетоном (внутренняя часть обечайки, внутренняя часть торцевой пластины, сварное соединение анкерного выпуска с замком, наружные элементы замка), преимущественно не имели следов коррозии или имели ее незначительные проявления.

Наибольшие коррозионные повреждения зафиксированы для элементов с открытым доступом агрессивной среды (наружный слой обечайки, наружный слой торцевой пластины), однако данные элементы не являются несущими. Забивной штифт и элементы замка в большей или меньшей степени (в зависимости от серии образцов) имели ограниченный контакт с агрессивной средой.

На образцах без коррозионной защиты (серия 1) выявлены коррозионные повреждения торцевой пластины, забивного штифта и элементов замка, образованные вследствие проникновения жидкой агрессивной среды (рис. 6).

На образцах с обработкой элементов замков многоцелевой ингибированной смазкой «Teboil» (серия 2) не было обнаружено следов коррозии на элементах замка и внутренней части забивного штифта. При этом излишки смазки, образовавшиеся на поверхности торцевых пластин при стыковке элементов штифтового соединения, благоприятно влияют на их защиту – площадь коррозионного поражения торцевой пластины значительно меньше в образцах из серии 2, чем на образцах без коррозионной защиты из серии 1 (рис. 7).

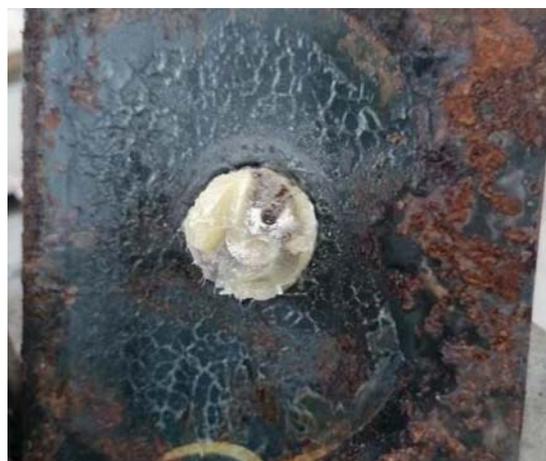
При осмотре опытных образцов с нанесением мастики «AquaMast» (серия 3) установлены нарушения сплошности покрытия мастикой торцевых пластин и внутренних элементов замка. Не покрытые мастикой участки имеют признаки коррозии. На замковых элементах и забивных штифтах наблюдаются явные коррозионные поражения (рис. 8).

Основные результаты визуального осмотра элементов разобранных серий фрагментов образцов, подвергнутых ускоренным коррозионным испытаниям при режиме № 2 в течение 90 суток, приведены в табл. 2. Полученные результаты также характерны для образцов, испытанных при режиме № 1.



Рис. 6. Общий вид и характерные повреждения элементов штифтового соединения (в разобранном виде) образцов серии № 1 (без коррозионной защиты) после ускоренных коррозионных испытаний при режиме № 2 в течение 90 суток: *а* – торцевая пластина с фиксирующим штырем; *б* – торцевая пластина с фиксирующим пазом; *в* – забивной штифт

Fig. 6. General view and typical damage to pin joint elements (disassembled) of the series No. 1 samples (without corrosion protection) after accelerated corrosion tests performed in the mode No. 2 for 90 days: *a* – end plate with locking dowel; *б* – end plate with locking block; *в* – locking pin



а



б



в

Рис. 7. Общий вид и характерные повреждения элементов штифтового соединения (в разобранном виде) образцов серии № 2 после ускоренных коррозионных испытаний при режиме № 2 в течение 90 суток: а – торцевая пластина с фиксирующим штырем; б – торцевая пластина с фиксирующим пазом; в – забивной штифт

Fig. 7. General view and typical damage to pin joint elements (disassembled) of the series No. 2 samples after accelerated corrosion tests performed in the mode No. 2 for 90 days: а – end plate with locking dowel; б – end plate with locking block; в – locking pin



Рис. 8. Общий вид и характерные повреждения элементов штифтового соединения (в разобранном виде) образцов серии № 3 после ускоренных коррозионных испытаний при режиме № 2 в течение 90 суток: а – торцевая пластина с фиксирующим штырем; б – торцевая пластина с фиксирующим пазом; в – забивной штифт

Fig. 8. General view and typical damage to pin joint elements (disassembled) of the series No. 3 samples after accelerated corrosion tests performed in the mode No. 2 for 90 days: а – end plate with locking dowel; б – end plate with locking block; в – locking pin

Таблица 2

Основные результаты визуального осмотра фрагментов опытных образцов после ускоренных коррозионных испытаний при режиме № 2 в течение 90 суток

Table 2

Main results of the visual inspection of tested sample fragments after accelerated corrosion tests performed in the mode No. 2 for 90 days

Серии опытных образцов	Наличие признаков коррозионного повреждения с распространением по площади поверхности элементов, %				
	наружные (формообразующие) элементы		несущие элементы		
	обечайка	торцевая пластина	фиксирующий штырь	фиксирующий паз	забивной штырь
Серия 1 (без коррозионной защиты)	Имеются, до 100 %	Имеются, до 100 %	Имеются, до 70 %	Имеются, до 70 %	Имеются, до 100 %
Серия 2 (гальванизация штифтов и применение многоцелевой ингибированной смазки на литиевой основе типа «Teboil»)	Имеются, до 100 %	Имеются, до 50 %	Не выявлены	Не выявлены	Не выявлены
Серия 3 (с нанесением битумной холодной мастики типа «AquaMast» на торцевые пластины)	Имеются, до 100 %	Имеются, до 10 %	Имеются, до 50 %	Имеются, до 50 %	Имеются, до 100 %
Примечание: признаков наличия коррозионных повреждений обетонированных несущих элементов для всех серий образцов не выявлено.					

Выполнена аппроксимация коррозионного повреждения на длительный срок эксплуатации с учетом полученных экспериментальных данных (скорость потери толщины металла для каждого элемента штифтового соединения, характер повреждения элементов) и справочных материалов [8–11 и др.], по ориентировочному критерию снижения рабочей площади поперечного сечения основных несущих элементов (забивной штифт, элементы замка) на 15 % в результате коррозионного повреждения (данный критерий может быть уточнен, например, с учетом приходящих на сваю проектных нагрузок и пр.). При эксплуатации штифтового соединения Leimet ABB+ 400 *без коррозионной защиты* в условиях уплотненных (без вовлечения воздуха) агрессивных грунтов и насыпей с подъемом грунтовых вод прогнозируемый срок службы его несущих элементов (по критерию потери 15 % рабочей площади металла поперечного сечения) составляет 35 лет; то же для неуплотненных (с вовлечением воздуха) агрессивных грунтов и насыпей с подъемом грунтовых вод – 25 лет. По совокупности признаков данные условия соответствуют сильноагрессивной среде грунта и грунтовых вод по СП 28.13330.2017 [2].

При использовании следующих защитных мероприятий: гальванизация забивных штифтов совместно с использованием многоцелевой ингибированной смазки на литиевой основе типа «Teboil», – прогнозируемый срок эксплуатации штифтового соединения Leimet ABB+ значительно увеличивается (для уточнения прогнозируемого срока службы с учетом обозначенной антикоррозионной защиты планируется проведение дополнительных исследований).

Выводы

По результатам выполненных исследований можно формулировать следующие выводы.

1. К металлическим элементам, входящим в состав рассматриваемого штифтового соединения Leimet ABB+, находящимся в непосредственном контакте с грунтом и грунтовыми водами, относятся обечайка, торцевая пластина и внешний торец забивного штифта. При этом основная (несущая) часть забивного штифта расположена внутри замка. К несущим металлическим элементам, входящим в состав рассматриваемого штифтового соединения Leimet ABB+ 400, относятся элементы системы «анкерный выпуск А500С Ø 25 мм–замок–штифт», среди которых наиболее вероятен контакт с агрессивной жидкой средой у элементов замка и забивного штифта.

2. При воздействии жидкой агрессивной среды на штифтовое соединение Leimet ABB+ без какой-либо антикоррозионной защиты наблюдаются признаки наличия коррозионных повреждений на всех его элементах, включая несущие.

3. В условиях выполненных ускоренных коррозионных испытаний рекомендованные производителем штифтового соединения методы защиты (гальванизация штифтов и применение многоцелевой ингибированной смазки типа «Teboil») позволили обеспечить коррозионную защиту его несущих элементов (забивных штифтов, элементов замка). Признаков коррозионного повреждения данных элементов не выявлено. Рекомендуется дополнительная антикоррозионная обработка торцевых пластин путем нанесения указанной смазки с целью заполнения зазора между ними.

4. Нанесение гидроизоляционной битумной холодной мастики типа «AquaMast» на торцевые пластины штифтового соединения до его сборки не позволяет обеспечить надежную антикоррозионную защиту металлических элементов штифтового соединения ввиду неравномерного покрытия их поверхностей. На покрытых мастикой металлических поверхностях не выявлены признаки коррозии. Требуется контроль качества обработки поверхностей мастикой, а также дополнительная обработка элементов замка.

5. Выполнена экспериментальная оценка прочности несущей системы «анкерный выпуск А500С Ø 25 мм–замок–штифт» штифтового соединения с учетом коррозионного повреждения элементов. Отказ системы происходит при усредненной нагрузке 308,7 кН в результате разрыва анкерного выпуска без разрушения элементов замка и забивного штифта.

6. Прогнозируемый срок эксплуатации штифтового соединения Leimet ABB+ 400 *без коррозионной защиты* в условии уплотненных (без вовлечения воздуха) агрессивных грунтов и насыпей с подъемом грунтовых вод и прогнозируемый срок службы его несущих элементов по критерию потери 15 % рабочей площади металла поперечного сечения забивного штифта и штыря замка (данный критерий может быть уточнен, например, с учетом входящих на сваю проектных нагрузок и пр.) составляет 35 лет; то же для неуплотненных (с вовлечением воздуха) агрессивных грунтов и насыпей с подъемом грунтовых вод – 25 лет. По совокупности признаков данные условия соответствуют сильноагрессивной среде грунта и грунтовых вод по СП 28.13330.2017 [2]. Учитывая возможное изменение характера и степени агрессивности среды эксплуатации железобетонных свай, а также невозможность выполнения мероприятий по их ремонту, применение штифтовых соединений Leimet ABB+ 400 без выполнения антикоррозионной защиты несущих металлических элементов (забивной штифт, элементы замка) не рекомендуется.

7. По совокупности установленных данных можно сделать вывод о пригодности штифтового соединения Leimet ABB+ 400 (даже без антикоррозионной защиты) для стыкования сборных железобетонных свай в условиях воздействия среднеагрессивной и сильноагрессивной среды грунта и грунтовых вод по СП 28.13330.2017 [2], при расчетном сроке службы возводимого сооружения 25 лет. Данный срок и иные параметры могут быть уточнены при дальнейших исследованиях.

8. При использовании следующих защитных мероприятий элементов замка: гальванизация забивных штифтов совместно с использованием многоцелевой ингибированной смазки на литиевой основе типа «Teboil» – *значительно* увеличивается прогнозируемый срок службы штифтового соединения (в рамках выполненных ускоренных коррозионных испытаний не выявлены признаки наличия коррозионных повреждений элементов с указанной антикоррозионной защитой). Данный метод антикоррозионной защиты рекомендуется к использованию в штифтовых соединениях свай. Для уточнения прогнозируемого срока службы штифтового соединения с устройством данной антикоррозионной защиты планируются дополнительные исследования на базе АО «НИЦ «Строительство».

Благодарности

Авторы выражают благодарность АО «НИЦ «Строительство» и ООО «Коперник» за предоставленные материалы.

Список литературы

1. ГОСТ Р 9.905-2007 (ИСО 7384:2001, ИСО 11845:1995) Единая система защиты от коррозии и старения (ЕСЗКС). Методы коррозионных испытаний. Общие требования. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 19 сентября 2007 г. № 246-ст. – Москва: Стандартинформ, 2007. – 20 с.
2. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85. Утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) от 27 февраля 2017 г. № 127/пр и введен в действие с 28 августа 2017 г. – Москва: Минстрой России, 2017. – 118 с.
3. *Гайдо А.Н.* Исследование конструктивно-технологических решений стыков заводских свай. [Электронный ресурс] // А.Н. Гайдо. – URL: http://trest28.ru/f/statya_gaydo_a.n._styki_svay.pdf (дата обращения: 10.08.2021 г.).
4. Новые технологии стыковки свай Leimet [Электронный ресурс]. – URL: <https://leimet.ru/> (дата обращения: 21.02.2022).
5. *Степанова М.А.* Опытное обоснование применения штифтового стыка свай / М.А. Степанова, А.Н. Гайдо // Технология и организация строительства. Материалы I Всероссийской межвузовской научно-практической конференции молодых ученых, посвященной 80-летию основания кафедры «Строительное производство». Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – Санкт-Петербург, 2020. – С. 379–388.
6. *Рытов С.А.* Опыт динамических испытаний штифтового стыка Leimet 350 ABB Plus составных сборных железобетонных свай / С.А. Рытов, А.А. Бутин // Вестник НИЦ Строительство. – 2019. – № 4 [23]. – С. 117–120.
7. ТУ 25.11.23-001-92894761-2018 «Соединение штифтовое для свай. Технические условия». – Екатеринбург: ООО «ГК «Коперник», 2018. – 27 с.
8. *Розенфельд И.Л.* Ускоренные методы коррозионных испытаний металлов / И.Л. Розенфельд, К.А. Жигалова. – М.: Металлургия, 1966. – 348 с.

9. Семенова И.В. Коррозия и защита от коррозии / И.В. Семенова, Г.М. Флорианович, А.В. Ворошилов; под ред. И.В. Семеновой – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 336 с.
10. Томашов Н.Д. Теория коррозии и защиты металлов / Н.Д. Томашов. – Москва: Изд-во Акад. наук СССР, 1959. – 592 с.
11. EN 1993-5:2007. Eurocode 3: Design of steel structures Part 5: Piling [Electronic Resource]. – Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.5.2007.pdf>

References

1. State Standard R 9.905-2007 (ISO 7384:2001, ISO 11845:1995). Unified system of protection against corrosion and aging (ESCCS). Methods of corrosion tests. General requirements. Moscow: Standartinform; 2007 (in Russian).
2. SP 28.13330.2017. Protection of building structures from corrosion. Updated edition of SNiP 2.03.11-85. Moscow: Ministry of Construction of Russia; 2017 (in Russian).
3. Gaido A.N. Research of structural and technological solutions of joints of factory piles [Internet]. Available at: http://trest28.ru/f/statya_gaydo_a.n._styki_svay.pdf (accessed 10 August 2021) (in Russian).
4. New technologies for joining piles Leimet [Internet]. Available at: <https://leimet.ru/> (accessed 21 February 2022) (in Russian).
5. Stepanova M.A., Gaido A.N. Experimental substantiation of the use of a pin joint of piles. In: Technology and organization of construction. Materials of the I All-Russian interuniversity scientific and practical conference of young scientists dedicated to the 80th anniversary of the founding of the Department of "Construction Production". St. Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering. St. Petersburg; 2020, p. 379–388 (in Russian).
6. Rytov S.A., Butin A.A. Experience of dynamic tests of the joint of the pin Leimet 350 ABB plus composite precast reinforced concrete piles. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2019;(4):117–120 (in Russian).
7. TU 25.11.23-001-92894761-2018. Pin connection for piles. Technical conditions. Yekaterinburg: LLC "GC "Copernicus"; 2018 (in Russian).
8. Rosenfeld I.L., Zhigalova K.A. Accelerated methods of corrosion testing of metals. Moscow: Metallurgiya Publ.; 1966 (in Russian).
9. Semenova I.V., Florianovich G.M., Voroshilov A.V. Corrosion and corrosion protection. Moscow: FIZMATLIT Publ.; 2002 (in Russian).
10. Tomashov N.D. Theory of corrosion and protection of metals Moscow: Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR; 1959 (in Russian).
11. EN 1993-5:2007. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 5: Piling [Internet]. Available at: <https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1993.5.2007.pdf>.

Информация об авторах / Information about the authors

Валентина Федоровна Степанова, д-р. техн. наук, проф., заведующая лабораторией коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Valentina F. Stepanova, Dr. Sci. (Engineering), professor, head of the Laboratory of Corrosion and Durability of Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete Structures (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Андрей Викторович Бучкин, канд. техн. наук, зам. заведующего лабораторией коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
Andrey V. Buchkin, Cand. Sci. (Engineering), deputy head of the Laboratory of Corrosion and Durability of Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete Structures (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

Константин Львович Кудяков[✉], канд. техн. наук, зав. сектором лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», доцент кафедры железобетонных и каменных конструкций НИУ МГСУ, Москва

Konstantin L. Kudyakov[✉], Cand. Sci. (Engineering), head of the Sector of the Laboratory of Corrosion and Durability of Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete Structures (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, associate professor of the Department of Reinforced Concrete and Stone Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow

Надежда Анатольевна Моисеева, научный сотрудник лаборатории коррозии и долговечности бетонных и ж/б конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва

Nadezhda A. Moiseeva, scientific researcher of the Laboratory of Corrosion and Durability of Research Institute of Concrete and Reinforced Concrete (NIIZHB) named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-82-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-82-94)

ПУТИ РАСШИРЕНИЯ СЫРЬЕВОЙ БАЗЫ И СНИЖЕНИЯ МАТЕРИАЛОЕМКОСТИ ПРОИЗВОДСТВА РЕАКТИВНЫХ ПОРОШКОВЫХ БЕТОНОВ

В.Р. ФАЛИКМАН, д-р материаловедения, канд. хим. наук

В.Ю. СОРОКИН✉

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. Реактивный порошок бетон относится к бетонам со сверхвысокими физико-механическими характеристиками и отличается высокой прочностью и плотностью. Специалистами НИИЖБ им. А.А. Гвоздева разработана технология получения и применения реактивных порошковых бетонов, получаемых на основе рядовых заполнителей, микрокремнезема и вяжущих низкой водопотребности, получаемых путем совместного помола при заданных условиях рационально подобранной сырьевой смеси, включающей портландцемент, минеральные добавки и химический модификатор. Технология проектирования реактивных порошковых бетонов заключается в переходе на более высокий уровень дисперсности, где место цемента как наиболее тонкомолотого компонента занимает микрокремнезем, роль мелкого заполнителя отводится вяжущему, а роль крупного заполнителя – песку. При этом обеспечивается достижение прочности при сжатии в возрасте 28 суток на уровне 160–200 МПа и прочности на растяжение при изгибе 20–30 МПа и более в зависимости от состава бетона, условий твердения, наличия микроармирующего компонента и др. Отличительной особенностью реактивных порошковых бетонов является повышенное содержание цементного вяжущего (800–1000 кг/м³), что обуславливает высокую материалоемкость реактивных порошковых бетонов и снижает их экономическую эффективность.

Цель. С целью снижения расхода цементной составляющей как наиболее энергоемкого и дорогостоящего компонента, была исследована возможность получения реактивных порошковых бетонов с заменой части клинкерного компонента в них различными минеральными добавками.

Материалы и методы. В качестве вяжущего при изготовлении реактивных порошковых бетонов использовалось композиционное вяжущее низкой водопотребности, а также различные активные минеральные добавки (метакаолин, доменный гранулированный шлак).

Результаты. В статье проведена сравнительная оценка технологических свойств бетонных смесей (плотность и водопотребность) и физико-механических характеристик реактивных порошковых бетонов различного состава (прочность на сжатие).

Выводы. Установлено, что при постоянном содержании в вяжущем микрокремнезема (25 %) до половины цементной составляющей вяжущих низкой водопотребности может быть заменено доменным шлаком при сохранении или относительно небольшом снижении прочности бетона (до 5–8 %). При этом достигается экономия цемента на уровне 300–400 кг на 1 м³ реактивного порошкового бетона.

Ключевые слова: ультравысокофункциональный бетон, реактивный порошок бетон, вяжущее низкой водопотребности, композиционное вяжущее, многокомпонентное вяжущее

Для цитирования: Фаликман В.Р., Сорокин В.Ю. Пути расширения сырьевой базы и снижения материалоемкости производства реактивных порошковых бетонов // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 82–94. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-82-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-82-94)

Вклад авторов

Фаликман В.Р. – общее руководство, определение цели и задач научных исследований.

Сорокин В.Ю. – проведение испытаний, анализ результатов, оформление статьи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

WAYS TO EXPAND THE RAW MATERIAL BASE AND REDUCE MATERIAL CONSUMPTION IN THE PRODUCTION OF REACTIVE POWDER CONCRETES

V.R. FALIKMAN, Dr. Sci. (Materials), Cand. Sci. (Chem.)

V.YU. SOROKIN✉

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

Abstract

Introduction. Reactive powder concrete (RPC) characterized by high strength and density falls into the category of concretes having ultra-high physicomechanical properties. NIIZHB specialists developed an RPC production and application technology involving the use of pit-run aggregates, silica fume, and low water demand binders (LWDBs) obtained via intergrinding using a rationally selected raw mixture, which includes portland cement, mineral admixtures, and a chemical modifier. The technology for developing RPCs adopts a higher dispersion degree, with cement as the most finely ground component replaced by silica fume, while the roles of fine and coarse aggregates are played by binder and sand, respectively. This factor ensures a compressive strength of 160–200 MPa at 28 days and a bending tensile strength of 20–30 MPa and greater, depending on concrete composition, hardening conditions, the presence of a micro-reinforcing component, etc. A distinctive feature of RPCs consists in the increased cement binder content (800–1000 kg/m³), leading to a high material consumption of RPCs, as well as reducing economic efficiency.

Aim. To study the feasibility of obtaining RPCs while replacing a certain amount of the clinker component with various mineral admixtures intended to reduce the consumption of the cement component, which is the most energy-intensive and costly component.

Materials and methods. A composite LWDB and various active mineral admixtures (metakaolin; granulated blast-furnace slag) were used as a binder in the production of RPCs.

Results. The paper provides a comparative analysis of the technological properties of concrete mixtures (density and water demand) and the physicomechanical properties of RPCs varying in composition (compressive strength).

Conclusions. It was established that up to half of the cement component used in LWDBs can be replaced by blast furnace slag at a constant silica fume content in the binder (25 %) while maintaining or slightly reducing the concrete strength (up to 5–8 %). In this case, it is possible to save about 300–400 kg of cement per 1 m³ of RPC.

Keywords: ultra-high performance concrete, reactive powder concrete, low water demand binder, composite binder, multi-component binder

For citation: Falikman V.R., Sorokin V.Yu. Ways to expand the raw material base and reduce material consumption in the production of reactive powder concretes. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 82–94 (In Russ.) doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-82-94](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-82-94)

Author contribution statements

Falikman V.R. – general supervision, definition of research aims and objectives.

Sorokin V.Yu. – performance of tests, analysis of results, text formatting.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Реактивный порошок бетон (РПБ) был разработан во Франции под торговой маркой DUCTAL в начале 1990-х годов в лаборатории «Буиг» (Bouygues) во Франции [1]. Первая в мире конструкция из РПБ, мост Шербрук в Канаде, была возведена в июле 1997 г. РПБ представляет собой композиционный материал сверхвысокой прочности, высокой плотности и долговечности. РПБ относится к специальным бетонам, микроструктура которых оптимизирована за счет точно подобранной гранулометрии всех частиц в смеси для достижения максимальной плотности. РПБ в целом можно рассматривать как модель для дальнейшего развития традиционных бетонов с переходом на более высокий уровень дисперсности. Для достижения высоких физико-механических характеристик в составе РПБ применяется микрокремнезем, обладающий пуццоланическими свойствами, а также портландцемент с оптимизированным химическим составом.

Высокое содержание цемента РПБ (порядка до 800 кг/м^3 и более) определяет относительное увеличение содержания воды в смесях для обеспечения необходимой удобоукладываемости, что, в свою очередь, вызывает тенденцию к увеличению усадки и деформаций ползучести. В статье представлена возможность получения РПБ с использованием так называемого высокопрочного вяжущего низкой водопотребности (ВНВ) с замещением части цемента активными минеральными добавками (метакаолин, шлак). Основным принципом изготовления ВНВ, изобретенного в 1984 г. является механическая и химическая активация рационально подобранной сырьевой смеси, включающей компонент клинкера, минеральные добавки, гипс (или портландцемент) с органическими модификаторами, содержащими водоредуцирующую добавку [2].

Производство вяжущего низкой водопотребности осуществляется при заданных условиях в мельницах, которые традиционно используются в цементной промышленности, то есть в трубчатых мельницах со специальными шаровидными мелющими телами [3, 4]. Использование механохимической активации обеспечивает значительное увеличение темпов твердения и прочности портландцемента, который, в свою очередь, будет использоваться в качестве основы для композиционных вяжущих с активностью 80–100 МПа в зависимости от исходного качества цемента; это соответствует повышению прочности примерно на 41–53 % через 28 дней, примерно на 30–70 % через 2–7 дней и более двух раз за 1 день. Наряду с вышесказанным обеспечивается существенное снижение (на 17–25 %) водопотребности цементного раствора, несмотря на повышение дисперсности вяжущего по сравнению с исходными цементами [5]. Удельный расход заполнителей (УРЗ), согласно Пауэрсу [6] выраженный как весовое соотношение заполнитель + наполнители к цементу,

применительно к бетонам на ВНВ по этому показателю значительно превосходит обычные портландцементы (до 13 для цемента против 27 для ВНВ), что позволяет рассматривать ВНВ как вяжущее нового поколения [7].

Как известно, в бетоне самым дорогостоящим компонентом является вяжущее, содержание которого в РПБ достигает до 800 кг на м³ и более. Применение недорогих и доступных тонкодисперсных минеральных добавок позволяет существенно сэкономить при производстве бетона. Кроме того, высокие расходы цемента приводят к загрязнению окружающей среды из-за выброса CO₂ в атмосферу цементными заводами. Замещение цемента минеральными добавками позволяет во многом решить эти проблемы [8, 9].

Тонкодисперсные минеральные добавки, применяемые в качестве компонента композиционных вяжущих, условно можно разделить на инертные и активные [10, 11].

Для производства композиционных вяжущих широко используются доменный гранулированный шлак [12–15]. Это обусловлено его высокой гидравлической активностью, позволяющей создавать вяжущие с минимальным содержанием цементного клинкера, а также положительным влиянием на большинство характеристик коррозионной стойкости бетонов.

Еще одной тонкодисперсной минеральной добавкой, в последнее время широко применяемой при изготовлении композиционных вяжущих для высокофункциональных бетонов, является метакаолин, представляющий собой дегидроксилированную форму глинистого минерала каолинита $Al_2O_3 \cdot 2SiO_2 \cdot 2H_2O$ [16, 17].

Цель исследования

Целью исследования является разработка составов и технологии изготовления реактивных порошковых бетонов с сниженной материалоемкостью за счет расширения сырьевой базы при помощи замещения части клинкерного компонента высокоэффективными активными минеральными добавками (метакаолин, доменный гранулированный шлак).

Материалы и методы исследования

Используемые материалы

В работе использовали доступное местное сырье, а именно чистоклинкерный портландцемент марки СЕМ I 52,5 (М600 по ГОСТ 10178-85), природный кварцевый песок, просеянный до фракции 0,16–0,5 мм (модуль крупности $M_{кр} = 1,01$, насыпная плотность 1396 кг/м³) и высокодисперсный микрокремнезем (МК, удельная поверхность $S_{уд} = 24700$ см²/г), шлак гранулированный (удельная поверхность $S_{уд} = 4500$ см²/г), метакаолин (МК, удельная поверхность $S_{уд} = 19000$ см²/г). Для приготовления ВНВ путем совместного измельчения с указанным портландцементом применяли суперпластификатор на основе полиметиленафталинсульфонатов (ПНС).

Методы исследования

Контроль качества РПБ смесей и бетона производился в соответствии с действующими стандартами, в том числе:

- контроль качества бетонных смесей – по ГОСТ 10181 и ГОСТ 310.4 (определение удобоукладываемости мелкозернистых смесей);
- плотность бетона – по ГОСТ 12730.1;
- контроль прочности бетона – по ГОСТ 10180.

Результаты исследования

Проведены исследования по оценке влияния на технологические свойства бетонных смесей для получения реактивных порошковых бетонов (РПБ) таких факторов, как виды, дозировка и способы введения различных минеральных добавок.

В работе оценивали возможность использования метакАОлина в качестве минеральной добавки. Результаты определения влияния добавки метакАОлина в составе вяжущего на технологические свойства бетонных смесей одинаковой подвижности и прочность реактивных порошковых бетонов приведены в табл. 1. и на рис. 1–5.

Проведенные испытания показали, что частичная замена микрокремнезема метакАОлином не приводит к существенному увеличению водопотребности – наблюдается даже некоторый пластифицирующий эффект: расплыв конуса при сопоставимом расходе воды не только не уменьшается, но даже увеличивается по сравнению с составом, не содержащим метакАОлин – со 147 до 203 мм. Однако при этом следует отметить, что полученный результат относится к показателю удобоукладываемости по ГОСТ 310.4-81, предусматривающему определение расплыва при встряхивании. Этот метод отражает способность смеси к тиксотропному разжижению, однако при отсутствии механических воздействий

Таблица 1

Влияние вида минерального компонента вяжущего на свойства бетонных смесей и прочность РПБ

Table 1

Effect of the mineral component used in the binder on the properties of concrete mixtures and RPC strength

№	Вид, состав вяжущего	Расход материалов, кг/м ³			РК*, мм	Плотность, кг/м ³	В/В	Условия твердения	R _{сж} /R _{изг} , МПа, в возрасте, сут			
		Вяжущее	Песок	Вода					1	2	7	28
1	ВНВ-75 (ПЦ(А) – 75 % МК – 25 %)	1036	915	215	147 (113)	2166	0,2	Норм	38,6/ 7,3	61,0/ 9,8	97,2/ 12,9	123,2/ 21,0
								Автоклав	–	135,8/ 26,0	–	144,7/ 23,1
2	ВНВ-75 (ПЦ(А) – 75 % МетакАОлин – 12,5 % МК – 12,5 %)	1073	948	208	203 (117)	2229	0,19	Норм	45,4/ 8,0	66,8/ 12,2	93,4/ 11,7	101,2/ 16,3
								Автоклав	–	125,6/ 15,2	–	134,3/ 22,8
3	ВНВ-75 (ПЦ(А) – 75 % МетакАОлин –25 %)	1037	916	261	179 (115)	2214	0,31	Норм	52,0/ 8,3	66,4/ 11,7	82,4/ 11,7	93,4/ 11,7
								Автоклав	–	96,8/ 17,6	–	101,2/ 15,5

Примечание: * – расплыв конуса со встряхиванием, в скобках – без встряхивания.

Note: * – slump flow after dropping the table; in brackets – without dropping the flow table.

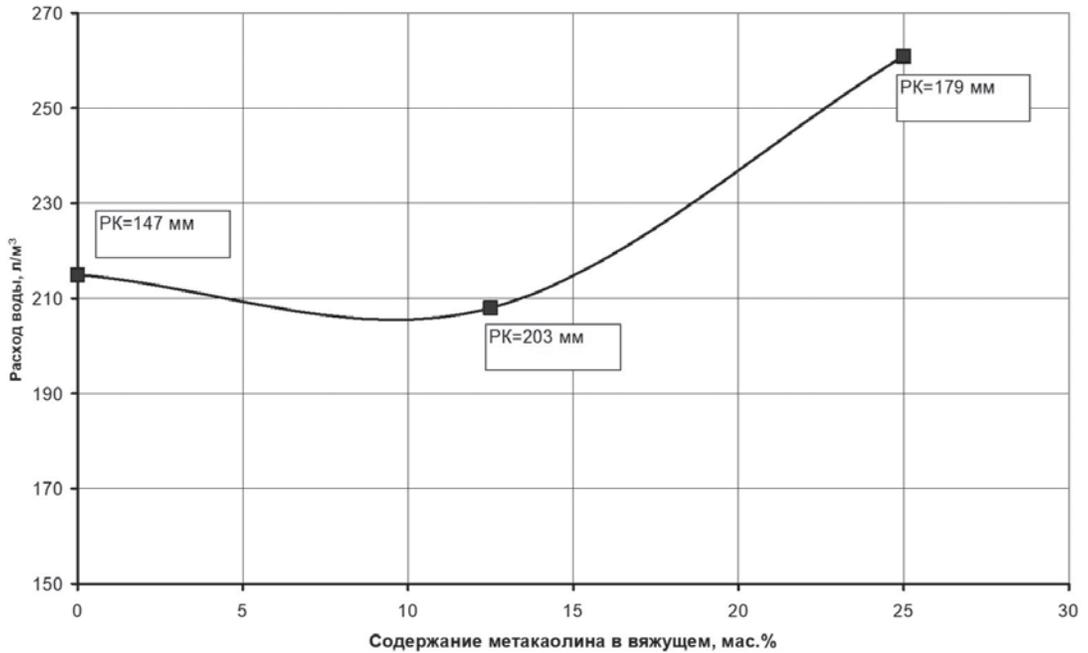


Рис. 1. Зависимость водопотребности РПБ-смесей от содержания метакаолина в вяжущем ВНВ-75 при замене соответствующего количества микрокремнезема

Fig. 1. Dependence between the water demand of RPC mixtures and the metakaolin content in LWDB-75 when replacing the corresponding amount of silica fume

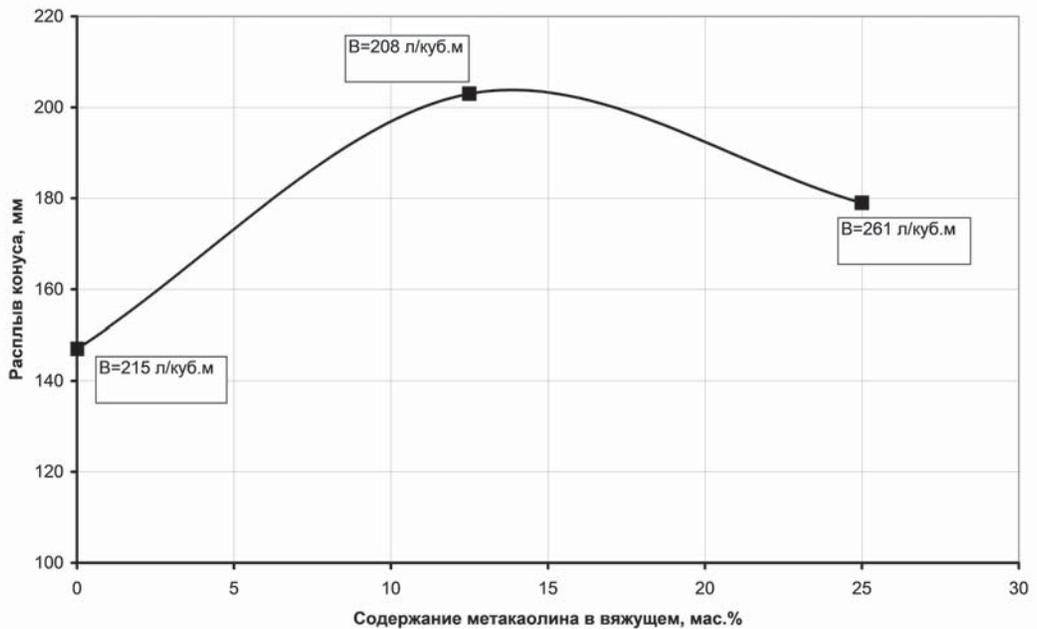


Рис. 2. Расплыв конуса РПБ-смесей при различном содержании метакаолина в вяжущем ВНВ-75

Fig. 2. Slump flow of RPC mixtures at different metakaolin contents in LWDB-75

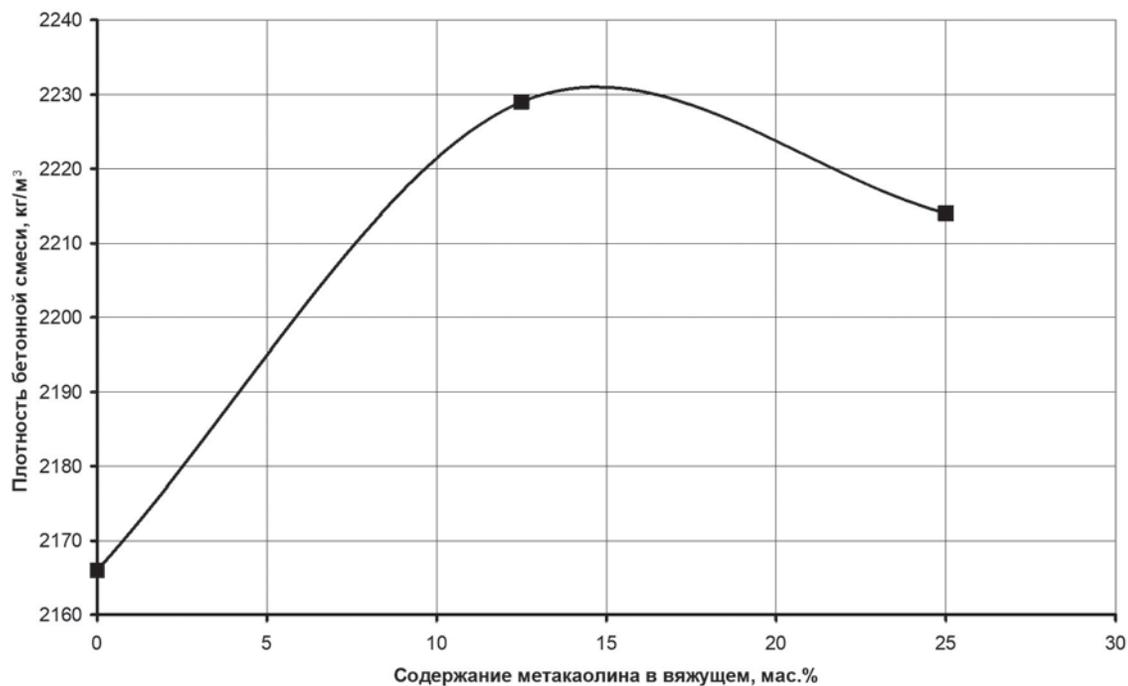


Рис. 3. Плотность РПБ-смесей в зависимости от содержания метакволина в вяжущем ВНВ-75
Fig. 3. Density of RPC mixtures depending on the metakaolin content in LWDB-75

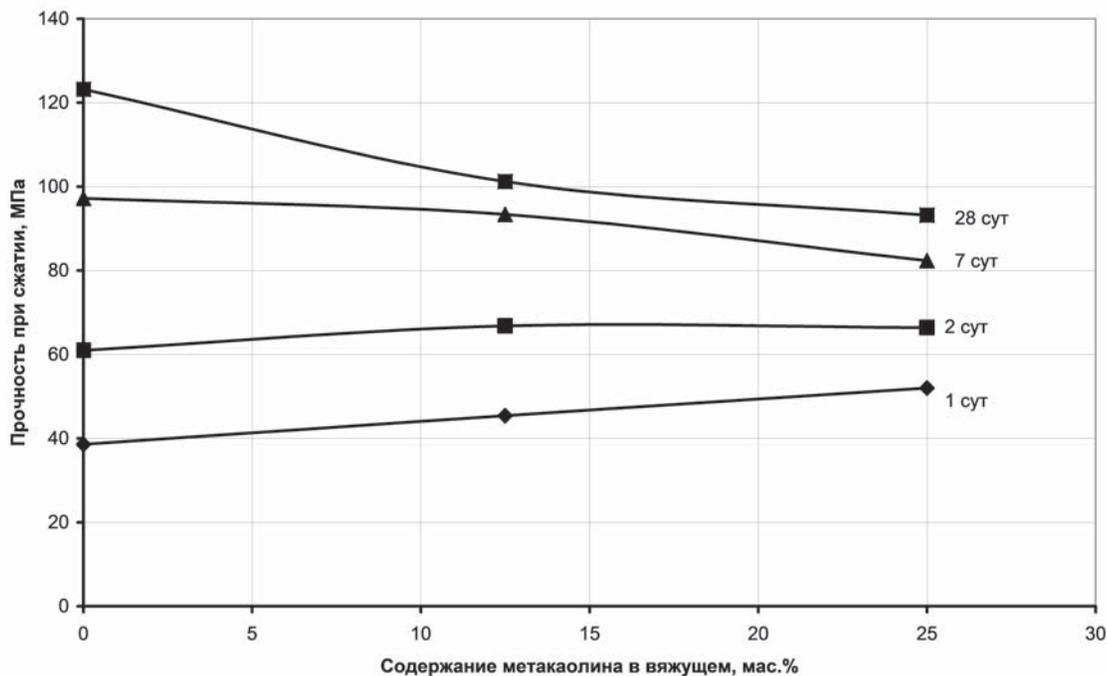


Рис. 4. Прочность РПБ в зависимости от содержания метакволина в вяжущем ВНВ-75 (твердение – нормальное)
Fig. 4. RPC strength depending on the metakaolin content in LWDB-75 (hardening – natural)

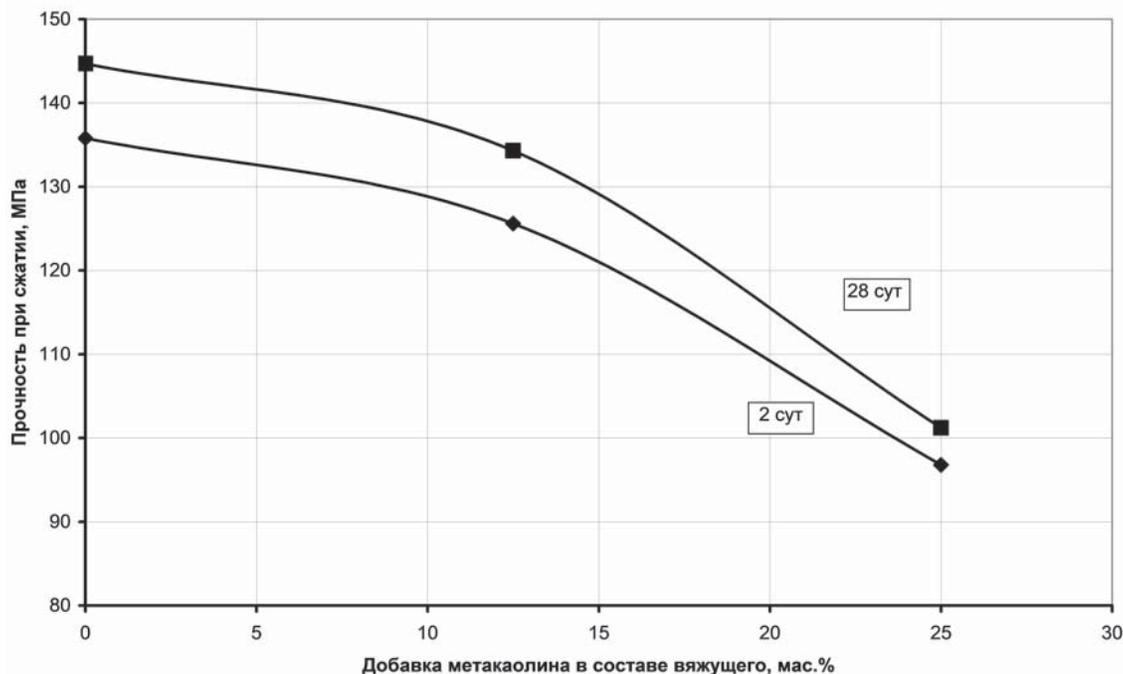


Рис. 5. Прочность РПБ в зависимости от содержания метакаолина в вяжущем ВНВ-75 (твердение – автоклавная обработка)

Fig. 5. RPC strength depending on the metakaolin content in LWDB-75 (hardening – autoclave treatment)

смесь на ВНВ-75 с метакаолином (состав 2) характеризуется более высокой вязкостью. Еще в большей степени это отличает смеси на ВНВ-75 с полной заменой микрокремнезема метакаолином (состав 3). В этом случае даже при значительном (с 215 до 261 л/м³, т. е. на 21 %) увеличении расхода воды затворения наблюдалось существенное загустевание бетонной смеси, а расплыв конуса при встряхивании не превысил 180 мм (рис. 1, 2). Плотность бетонной смеси на вяжущем с частичной заменой микрокремнезема метакаолином возрастает, а при полной замене – несколько уменьшается (рис. 3), что может быть связано с существенным ростом водопотребности бетонной смеси и морфологией метакаолина.

Характер влияния добавки метакаолина на прочность РПБ зависит от возраста бетона. В возрасте 1 сут нормального твердения прочность бетона возрастает с увеличением содержания метакаолина в вяжущем, что может быть связано с наличием в нем не только силикатной, но и алюминатной и щелочной фаз. В возрасте 2 сут показатели прочности выравниваются, а в более поздние сроки все больше возрастает прочность бетона с микрокремнеземом, очевидно, вследствие повышения роли пуццолановой реакции в процессе твердения (рис. 4). После автоклавной обработки, способствующей наиболее интенсивному и полному протеканию пуццолановой реакции, прочность РПБ как в раннем возрасте, так и в возрасте 28 сут возрастает с увеличением содержания МК в вяжущем (рис. 5). Частичная (50 %) замена микрокремнезема метакаолином приводит к относительно небольшому снижению прочности – со 135,8 до 125,6 МПа (т. е. на 8 %) в возрасте 2 сут и со 144,7 до 134,3 МПа (т. е. на 7 %) в возрасте 28 сут.

Так называемый «индекс цементирующей эффективности» метакаолина, в зависимости от его расхода, составляет 1,52–2,27, тогда как для микрокремнезема он составляет 2,15–2,93. В связи с этим при полной замене микрокремнезема метакаолином снижение прочности носит резкий характер и составляет во все сроки около 30 %.

Если метакаолин, характеризующийся высокой дисперсностью (около 24000 см²/г) и потенциальной гидравлической активностью, рассматривался как материал для замены микрокремнезема в РПБ, то шлак использовался для замены в вяжущем цементной составляющей. При этом долю микрокремнезема в составе вяжущего во всех случаях принимали постоянной и равной 25 %. Шлак вводили в вяжущее в количестве 10, 22,5 и 37,5 % с соответствующим уменьшением расхода цемента (портландцемент марки 600). В экспериментах использовали молотый шлак производства «Тулачермет» с удельной поверхностью 4430 см²/г. Составы и результаты испытаний бетонных смесей и бетонов, включая прочность при нормальном твердении и после автоклавной обработки, на ВНВ-75 с частичной заменой цементной составляющей молотым шлаком приведены в табл. 2 и представлены на рис. 6–8.

Полученные данные показывают, что при постоянных параметрах изготовления вяжущих и постоянном значении водо/вяжущего отношения, равном 0,2, замена цемента в вяжущем соответствующим количеством молотого шлака сопровождается снижением водопотребности бетонных смесей: расплыв конуса возрастает с 147 до 186–209 мм (рис. 6). Замена до половины цементной составляющей в составе вяжущего шлаком не приводит к существенному

Таблица 2

Влияние добавки шлака для замены цементной составляющей вяжущего на свойства бетонных смесей и прочность РПБ

Table 2

Effect of adding slag to replace the cement binder component on the properties of concrete mixtures and RPC strength

№ п/п	Вид вяжущего	Расход материалов, кг/м ³			ρ _{б.с.} , кг/м ³	РК, мм	В/В	Условия твердения	R _{сж} /R _{изг.} МПа, в возрасте (сут)			
		Вяжущее	Песок	Вода					1	2	7	28
1	ВНВ-75 (ПЦ (А) – 75 % МК – 25 %)	1036	915	215	2166	147	0,2	КНТ	38,6/ 7,4	61,6/ 8,9	97,2/ 12,9	123,2/ 25,5
								Автоклав	–	137,3/ 27,2	–	147,8/ 29,4
2	ВНВ-65 (ПЦ(А) – 65 % МК – 25 % Шлак – 10 %)	1034	913	214	2161	152	0,2	КНТ	28,4/ 6,9	57,3/ 7,7	83,1/ 11,5	116,8/ 21,7
								Автоклав	–	124,4/ 19,4	–	131,6/ 24,8
3	ВНВ-50 (ПЦ(А) – 52,2 % МК – 25 % Шлак – 22,5 %)	1032	912	214	2158	186	0,2	КНТ	26,3/ 6,8	54,8/ 8,0	81,2/ 10,6	114,6/ 21,3
								Автоклав	–	108,0/ 16,4	–	126,8/ 22,7
4.	ВНВ-35 (ПЦ(А) – 37,5 % МК – 25 % Шлак – 37,5 %)	1024	904	212	2140	209	0,2	КНТ	24,8/ 4,7	40/ 7,7	73,4/ 9,2	112,8/ 21,3
								Автоклав	–	111,5/ 15,9	–	123,1/ 19,6

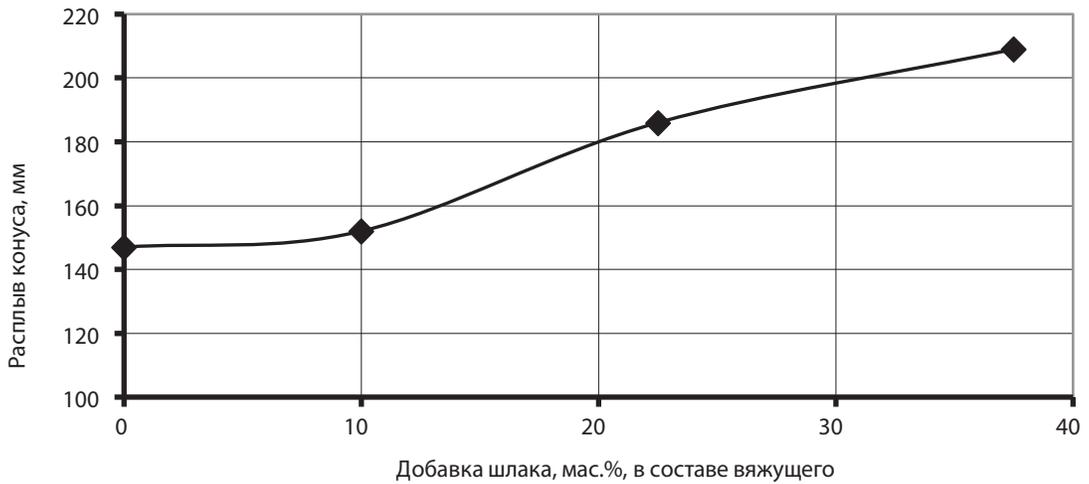


Рис. 6. Влияние добавки шлака в составе вяжущего ВНВ-75 взамен соответствующего количества цемента (МК = 25 % – const) на расплыв конуса РПБ-смесей (В/Вяз = const)

Fig. 6. Effect of adding slag to LWDB-75 to replace a corresponding amount of cement (SF = 25 % – const) on the slump flow of RPC mixtures (water/binder ratio = const)

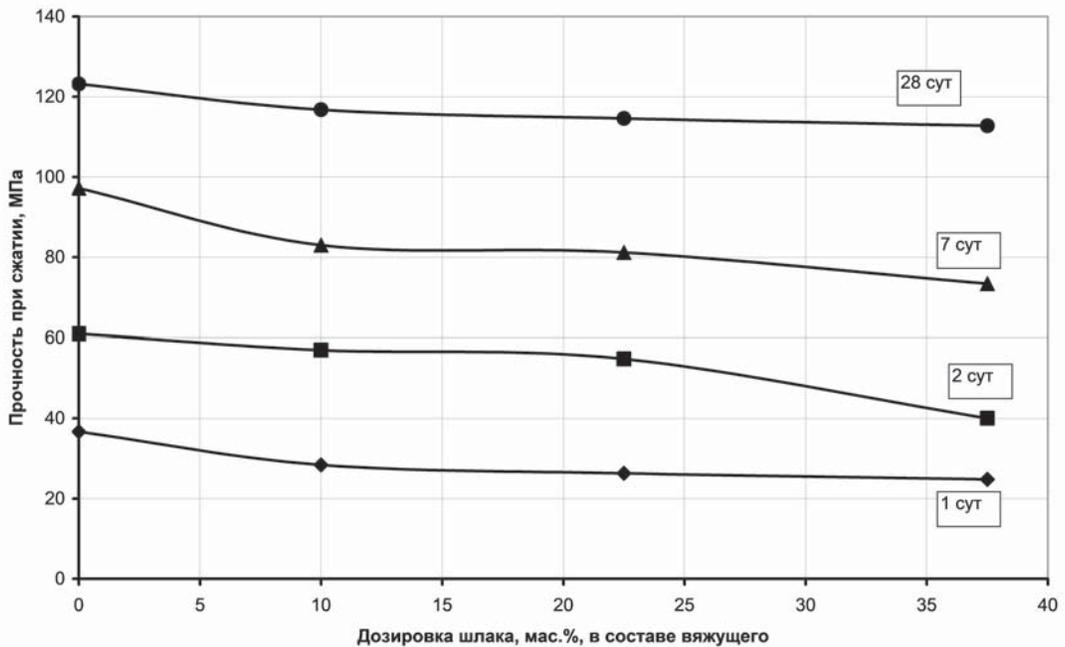


Рис. 7. Влияние добавки шлака в составе вяжущего ВНВ-75 взамен соответствующего количества цемента (МК = 25 % – const) на прочность РПБ (твердение – нормальное)

Fig. 7. Effect of adding slag to LWDB-75 to replace a corresponding amount of cement (SF = 25 % – const) on RPC strength (hardening – natural)

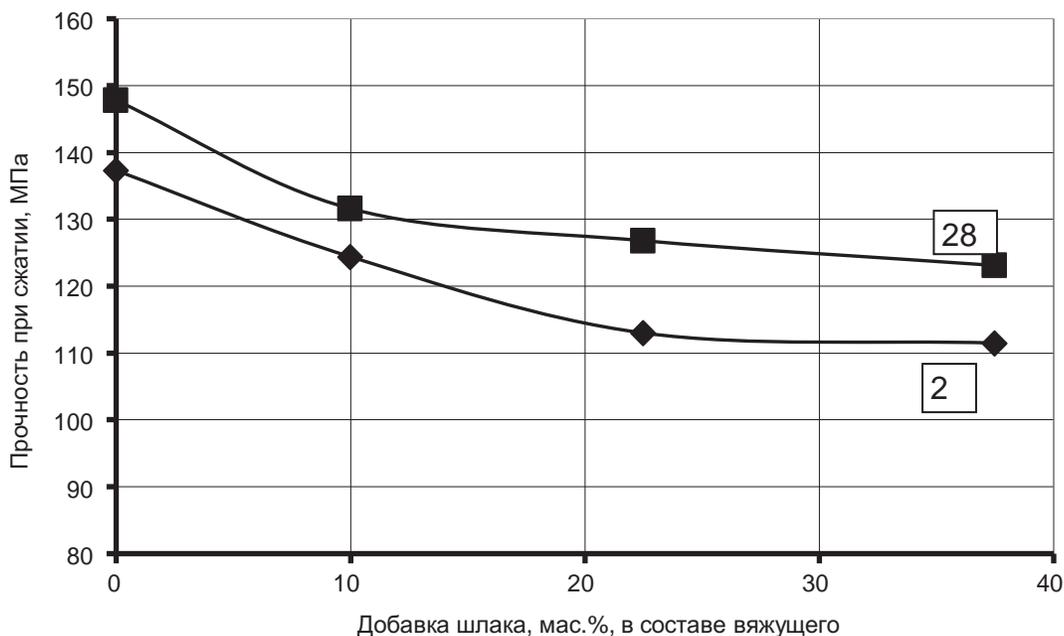


Рис. 8. Влияние добавки шлака в составе вяжущего ВНВ-75 взамен соответствующего количества цемента (МК = 25 % – const) на прочность РПБ (твердение – автоклавная обработка)
Fig. 8. Effect of adding slag to LWDB-75 to replace a corresponding amount of cement (SF = 25 % – const) on RPC strength [hardening – autoclave treatment]

снижению прочности: в возрасте 1 сут нормального хранения снижение прочности бетона на вяжущем с максимальной заменой цементной составляющей шлаком составляет 36 %, а в возрасте 28 сут – только около 8 %. Соответствующие значения для бетонов, подвергнутых автоклавной обработке, составили 21 и 17 % (2 и 28 сут соответственно) (рис. 7–8).

Выводы

Анализ экспериментальных данных показывает, что наиболее эффективным способом применения метакаолина при получении РПБ является его использование в качестве компонента вяжущего при частичной замене им микрокремнезема. В этом случае обеспечивается повышение технологических свойств бетонных смесей без существенного снижения прочностных свойств и темпов твердения бетона.

Установлено, что добавление в состав вяжущего молотого доменного гранулированного шлака может являться эффективным средством снижения вредных воздействий на окружающую среду за счет уменьшения цементной составляющей в ВНВ и, как следствие, выбросов CO_2 в атмосферу в связи с тем, что на цементную промышленность приходится примерно 7 % всех глобальных выбросов диоксида углерода в атмосферу. Это особенно актуально с учетом повышенного содержания вяжущего в РПБ-смесях, составляющего 800–1000 кг/м³. В этом случае замена шлаком 50 % цементной составляющей вяжущего соответствует экономии 300–400 кг цемента на 1 м³.

Список литературы

1. *Richard P.* Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200–800 MPa Compressive Strength / P. Richard, M.H. Cheyrezy // Concrete Technology Past, Present and Future: Proceedings of the V.M. Malhotra Symposium ACI SP-144 / ed. P.K. Metha. – San Francisco, 1994. – P. 507–518.
2. Бетоны на вяжущем с низкой водопотребностью / В.Г. Батраков, Ш.Т. Бабаев, Н.Ф. Башлыков, В.Р. Фаликман // Бетон и железобетон. – 1988. – № 11. – С. 4–6.
3. Гидравлический цемент: пат. RU 2096364 / Н.Ф. Башлыков, Ш.Т. Бабаев, С.А. Зубехин [и др.]. – Опубл. 20.11.1997.
4. Cementitious Materials and Method of Making the Same: Patent US 5478391A / S.T. Babaev, N.F. Bashlykov, V.R. Falikman [et al.]. – Publ. date 26.12.1995.
5. *Ioudovitch B.E.* Low-water Requirement Binders as New-generation Cements / B.E. Ioudovitch, A.M. Dmitriev, S.A. Zoubekhin [et al.] // Proceedings of 10th International Congress on the Chemistry of Cement. – Göteborg, Sweden, 1997. – Pub. No. 3iii021.
6. *Powers T.C.* The properties of fresh concrete / T.C. Powers. – New York: John Wiley & Sons, 1968. – 664 p.
7. *Falikman V.R.* Low Water Demand Technology for Environmentally Friendly Cements with Low Clinker Content / V.R. Falikman, N.F. Bashlykov // Proceedings of the International RILEM Conference "Advances in Construction Materials Through Science and Engineering", 5–7 September 2011, Hong Kong, China. – RILEM Publications S.A.R.L., 2011. – P. 633–642.
8. *Wang K.* Evaluating Properties of Blended Cement for Concrete Pavements: Final Report Center of Cement Concrete Pavement Technology / K. Wang, G. Zhi. Iowa State University, Ames, IA, 2003. – 59 p.
9. *Фаликман В.Р.* Минеральные добавки в современной технологии бетона / В.Р. Фаликман // Conference Proceedings of ICCX Russia – 2020, 01–04 December 2020, St. Petersburg. – P. 12–23.
10. *Коваль С.В.* Развитие научных основ модифицирования бетонов полифункциональными добавками: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.23.05 / С.В. Коваль. – Одесса, 2004. – 43 с.
11. *Sersale R.* Mechanism and Reaction Products of Lime with Pozzlanas and Blast Furnace Slags / R. Sersale // 20, New Ser., 1971. – P. 5–13.
12. *Schroder F.S.* Slags and Slag Cement / F.S. Schroder // Proceedings of the V Internatinal Symposium on the Chemistry of Cement. – Tokyo, 1968. – P. 206–217.
13. *Гинзбург И.Г.* Шлакопортландцемент как вяжущее для гидротехнического бетона / И.Г. Гинзбург. – Ленинград: ВНИИТ, 1971. – 360 с.
14. *Крамер В.* Влияние химического состава и физической структуры доменного шлака на его активность / В. Крамер // Четвертый Международный конгресс по химии цемента. – Москва: Стройиздат, 1964. – С. 563–575.
15. *Крамер В.* Доменные шлаки и шлаковые цементы / В. Крамер // Труды VI Международного конгресса по химии цементов. – Москва: Стройиздат, 1964. – С. 497–519.
16. *Горшков В.С.* Методы физико-химического анализа вяжущих веществ / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – Москва: Высшая школа, 1981. – 333 с.
17. *Коротких Д.Н.* О требованиях к наномодифицирующим добавкам для высокопрочных цементных бетонов / Д.Н. Коротких // Нанотехнологии в строительстве. – 2009. – № 2. – С. 42–49.

References

1. *Richard P., Cheyrezy M.H.* Reactive Powder Concretes with High Ductility and 200–800 MPa Compressive Strength. In: *Metha P.K.*, ed. Concrete Technology Past, Present and Future, Proceedings of the V.M. Malhotra Symposium ACI SP-144. San Francisco; 1994, p. 507–518.
2. *Batratkov V.G., Babaev Sh.T., Bashlykov N.F., Falikman V.R.* Binder-based concrete with low water demand. Beton i zhelezobeton [Concrete and reinforced concrete]. 1988;(11):4–6 [in Russian].
3. *Bashlykov N.F., Babaev Sh.T., Zubezhin S.A., Serdyuk V.N., Falikman V.R., Yudovich B.E., et al.* Hydraulic cement. Patent of Russian Federatiom no. 2096364. Publ. date 20.11.1997 [in Russian].
4. *Babaev Sh.T., Bashlykov N.F., Zubezhin S.A., Serduk V.N., Serykh R.L., Falikman V.R., et al.* Cementitious Materials and Method of Making the Same. Patent USA no 5478391A. Publ. date 26.12.1995 [in Russian].

5. *Ioudovitch B.E., Dmitriev A.M., Zoubekhin S.A., Bashlykov N.F., Falikman V.R., Serdyuk V.N.* Low-water Requirement Binders as New-generation Cements. In: Proceedings of 10th International Congress on the Chemistry of Cement. Göteborg, Sweden; 1997, Pub. No. 3iii021.
6. *Powers T.C.* The properties of fresh concrete. New York: John Wiley & Sons; 1968.
7. *Falikman V.R., Bashlykov N.F.* Low Water Demand Technology for Environmentally Friendly Cements with Low Clinker Content. In: Proceedings of the International RILEM Conference "Advances in Construction Materials Through Science and Engineering", 5–7 September 2011, Hong Kong, China. RILEM Publications S.A.R.L.; 2011, p. 633–642.
8. *Wang K., Zhi G.* Evaluating Properties of Blended Cement for Concrete Pavements. Final Report Center of Cement Concrete Pavement Technology. Iowa State University, Ames, IA; 2003.
9. *Falikman V.R.* Mineral additives in modern concrete technology. In: Conference Proceedings of ICCX Russia – 2020, 01–04 December 2020. St. Petersburg; 2020, p. 12–23 (in Russian).
10. *Koval S.V.* Development of scientific bases for modifying concrete with polyfunctional additives. Ph.D. Odessa; 2004 (in Russian).
11. *Sersale R.* Mechanism and Reaction Products of Lime with Pozzlanas and Blast Furnace Slags. In: 20, New Ser.; 1971, p. 5–13.
12. *Schroder F.S.* Slags and Slag Cement. In: Proceedings of the V International Symposium on the Chemistry of Cement. Tokyo; 1968, p. 206–217.
13. *Ginzburg I.G.* Portland slag cement as a binder for hydrotechnical concrete. Leningrad: VNIIT; 1971 (in Russian).
14. *Kramer V.* Influence of chemical composition and physical structure of blast-furnace slag on its activity. In: Fourth International Congress on Cement Chemistry. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1964, p. 563–575 (in Russian).
15. *Kramer V.* Blast furnace slags and slag cements. In: Proceedings of the VI International Congress on the Chemistry of Cements. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1964, p. 497–519 (in Russian).
16. *Gorshkov V.S., Timashev V.V., Saveliev V.G.* Methods of physic-chemical analysis of binders. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 1981 (in Russian).
17. *Korotkikh D.N.* On the requirements for nano-modifying additives for high-strength cement concrete. Nanotekhnologii v stroitel'stve = Nanobuild. 2009;(2):42–49 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Вячеслав Рувимович Фаликман, д-р материаловедения, канд. хим. наук, руководитель центра научно-технического сопровождения технически сложных объектов строительства № 20 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vfallikman@yandex.ru

Vyacheslav R. Falikman, Dr. Sci. (Materials), Cand. Sci. (Chem.), Head of the Center for the Scientific and Technical Support of Technically Challenging Construction Projects No. 20, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vfallikman@yandex.ru

Всеволод Юрьевич Сорокин✉, ведущий специалист Центра научно-технического сопровождения технически сложных объектов строительства № 20 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: vsevolod-sorokin@yandex.ru

Vsevolod Yu. Sorokin✉, Leading Specialist, Center for the Scientific and Technical Support of Technically Challenging Construction Projects No. 20, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: vsevolod-sorokin@yandex.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.130

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-95-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-95-102)

УЧЕТ ВЛИЯНИЯ ОПАСНОГО КРИОГЕННОГО ПРОЦЕССА КУРУМООБРАЗОВАНИЯ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ СООРУЖЕНИЙ НА ПРИМЕРЕ ОПОР ВЛ ДЛЯ ГМК «УДОКАНСКАЯ МЕДЬ»

Д.В. ЧЕРНЯТИН

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

Аннотация

Введение. На сегодняшний день принципы строительства на курумах разработаны лишь теоретически, а степень их проверки на практике очень небольшая, так как масштаб инженерного освоения курумовых склонов еще весьма незначительный. Этот факт приводит к тому, что при проектировании сооружений в районе развития данного процесса не существует единого подхода к разработке мероприятий по снижению опасности процесса курумообразования, закрепленного в нормативной документации.

Цель. Рассмотреть проблему учета влияния процесса курума на проектируемые сооружения на примере опор ВЛ для ГМК «Удоканская медь» и осветить принятые инженерные решения для локализации данного процесса на конкретном примере.

Материалы и методы. Рассмотрена проблема учета влияния процесса курума на проектируемые сооружения на примере опор воздушных линий для горно-металлургический комбинат «Удоканская медь». Представлены принятые по данному объекту инженерные решения по защите конструкций с помощью создания зон безопасности между телом курума и сооружением. А также заложены предпосылки для разработки рекомендаций по проектированию в районах развития опасных криогенных процессов. Для обоснования принятых решений выполнено математическое моделирование в расчетном комплексе PLAXIS 2D.

Результаты. В результате расчетов получены изополя перемещения грунтов основания и фундамента сооружения при заданном перемещении тела курума по склону. Из полученных результатов следует, что смещение тела курума не влияет на конструкции фундаментов ВЛ при создании буферной зоны.

Выводы. Вопрос учета влияния опасного криогенного процесса курумообразования при проектировании – крайне неисследованный на практике и нуждается в изучении для дальнейшего закрепления методов инженерной защиты от курумов в нормативной документации.

Ключевые слова: курумы, инженерная защита, криогенные процессы, опасные геологические процессы, математическое моделирование

Для цитирования: Чернятин Д.В. Учет влияния опасного криогенного процесса курумообразования при проектировании сооружений на примере опор ВЛ для ГМК «Удоканская медь» // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 95–102. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-95-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-95-102)

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.

ACCOUNTING FOR THE IMPACT OF HAZARDOUS FROST ACTION INVOLVING STONE RUN FORMATION IN THE DESIGN OF STRUCTURES ON THE EXAMPLE OF OVERHEAD LINE TOWERS FOR UDOKAN COPPER

D.V. CHERNYATIN

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

Abstract

Introduction. To date, construction principles applied to stone runs have only been developed in theory, while the extent to which they are tested in practice is limited since the engineering development of sloping stone runs is still rather narrow in scope. This factor leads to the lack of a unified formalized approach to the development of measures intended to reduce the risk of stone run formation when designing structures in areas affected by this process.

Aim. To consider a problem associated with factoring in stone run formation in the design of structures on the example of overhead line towers for Udokan Copper, as well as covering adopted engineering solutions providing a means to localize this process using a specific example.

Materials and Methods. The paper considers a problem associated with factoring in stone run formation in the design of structures on the example of overhead line towers for the Udokan Mining and Metallurgical Plant. Engineering solutions adopted for this facility in order to protect structures by creating buffer zones between the stone run and the structure are presented. In addition, the basis was provided for developing recommendations on structure design for areas prone to hazardous frost action. In order to justify adopted solutions, mathematical modeling was performed using PLAXIS 2D software.

Results. The calculations yielded isofields showing soil base and foundation displacements for a given stone run displacement along the slope. The obtained results indicate that stone run displacements do not affect overhead line tower foundations when a buffer zone is created.

Conclusions. The issue associated with factoring in the impact of hazardous frost action involving stone run formation in the design of structures remains to be explored in practice, requiring further consideration in order to further formalize the methods of engineering protection against stone runs in regulatory documents.

Keywords: stone runs, engineering protection, frost action, hazardous geological processes, mathematical modeling.

For citation: Chernyatin D.V. Accounting for the impact of hazardous frost action involving stone run formation in the design of structures on the example of overhead line towers for Udokan Copper. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 95–102 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-95-102](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-95-102)

Author contribution statement

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

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Введение

Курумы – это подвижные скопления дресвяно-щебнисто-глыбового материала на склонах различной крутизны (от 3 до 45°), сложенные преимущественно скальными породами. Характерны для горных районов с суровым континентальным климатом с наличием многолетнемерзлых пород. Образуются в результате интенсивного физического выветривания и криогенного выпучивания крупнообломочного материала, десерпции (криогенной, термогенной и влажностной), суффозии и локального накопления мелкозема. Они занимают обширные склоны, образуют «потоки» и «сети», слагают уступы нагорных террас [1, 4, 5]. По подвижности курумы разделяют на действующие (подвижные) и затухшие, т. е. практически неподвижные. Скорость подвижных курумов может достигать от 3 до 10 см в год [3]. При этом тело подвижной части курума мощностью 2–3 м может создавать в зоне взаимодействия с сооружением предельное давление порядка 100 кН, а при увеличении мощности курума – более 100 кН, что представляет наибольшую угрозу в первую очередь для конструкций линейных сооружений.

На сегодняшний день принципы строительства на курумах разработаны лишь теоретически, а степень их проверки на практике очень небольшая, так как масштаб инженерного освоения курумовых склонов еще весьма незначительный [2]. Этот факт приводит к тому, что при проектировании сооружений в районе развития данного процесса не существует единого взгляда на методы борьбы с процессом курумообразования, закрепленного в нормативной документации.

Проблема учета влияния процесса курумообразования на проектируемые сооружения на примере ГМК «Удоканская медь»

В июне 2021 г. сотрудниками НИИОСП им. Н.М. Герсевича была выполнена работа по научно-техническому сопровождению проектно-изыскательских работ по объекту: «Горно-металлургический комбинат «Удокан». Первая очередь строительства на производительность 12,0 млн тонн руды в год. Внешнее электроснабжение». В ходе работы был выполнен детальный анализ криогенного процесса курумообразования применительно к существующим условиям на объекте проектируемого строительства, а также разработаны рекомендации по мерам борьбы с данным процессом.

ГМК «Удоканская медь» расположен на севере Забайкальского края в пределах Каларского района. Территория района находится в области резко-континентального климата умеренного пояса. Различия в климате отдельных частей территории обусловлены резким перепадом высот и горно-котловинным характером рельефа. На территории распространены многолетнемерзлые породы сплошного типа. Мощность ММП достигает от 800 до 1200 м при минимальной отрицательной температуре на глубине нулевой годовой амплитуды от –6 до –12 °С.

В результате изысканий для строительства линий внешнего электроснабжения для предприятия было установлено, что проектируемые опоры находятся на участке склона, где развивается процесс курума. На рис. 1 показан процесс монтажа опор ВЛ на склоне с курумом.

Площади распространения курумных полей на участке строительства изменяются от нескольких десятков до нескольких сотен квадратных метров. Наименьшая мощность (0,5–1,0 м) курумов наблюдается на участках интенсивного сноса обломочного материала,



Рис. 1. Процесс монтажа опор ВЛ для ГМК «Удоканская медь» на склоне с курумом (фото с сайта Чита.ру)
Fig. 1. Installation of overhead line towers for Udokan Copper on a slope having a stone run
 (photo from <https://www.chita.ru/>)

а наибольшая (3–6 м) – на участках аккумуляции склоновых отложений. Максимальное прогнозируемое смещение активной части курума по результатам ИГИ достигает 0,4 м в год.

Проектируемые опоры представляют собой металлоконструкции в виде ферм, установленные на железобетонные подножки с плоской платформой в основании (рис. 2).

Для минимизации негативного влияния экзогенных геологических процессов был принят ряд инженерных решений. Под подошвой фундаментов выполняется выравнивающая подготовка из щебня толщиной 100 мм. Для ограничения касательных сил морозного пучения предусмотрена обмазка стоек подножников кремнийорганической эмалью КО-174. Для сохранения свойств вечномерзлых грунтов оснований, сложенных супесями либо

пылеватыми песками, предусматривается теплоизолирующий слой из экструзионного пенополистирола с закрытыми порами, а также устройство средств мониторинга вечной мерзлоты.

В качестве мер инженерной защиты от воздействия курума специалистами НИИОСП им. Н.М. Герсевича предложен метод создания зон безопасности перед фундаментами опор вверх по склону. Зона безопасности состоит из выровненной площадки, под фундаменты опор заполненной обратной засыпкой, в которой устраивается улавливающая траншея. Размер зоны безопасности зависит от мощности активной толщи курума. Большое количество подвижного материала приводит к необходимости увеличения расстояния от кромки курума до фундамента сооружения, это нужно для уменьшения передаваемого давления и исключения засыпания конструкций обломочным материалом.

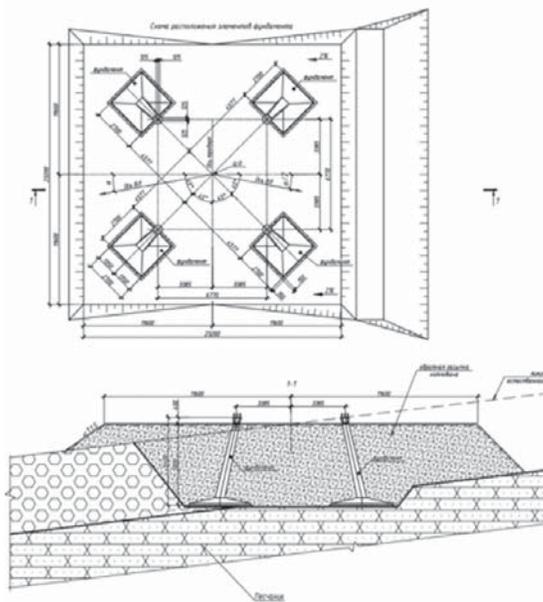


Рис. 2. Схема конструкций фундаментов ВЛ
Fig. 2. Schematic of overhead line tower foundations

В случае с опорами ВЛ на ГМК «Удоканская медь» расстояние вверх по склону от фундамента опор до кромки курума составило 10 м при максимальной мощности активной части курума 3 м. На площадке зоны безопасности должен обеспечиваться отвод поверхностных и грунтовых вод со дна траншеи. Траншее необходимо расширять в случае заполнения ее обломочным материалом. В период эксплуатации сооружения проводится регулярный мониторинг состояния зоны безопасности и активного слоя курума.

Для оценки влияния смещения курума и эффективности выбранных мер защиты против данного процесса был выполнен расчет методом математического моделирования в программе Plaxis. Для характеристик материалов модели взяты данные из отчета по инженерно-геологическим изысканиям. Согласно данному отчету курумные отложения имеют следующие характеристики: $\rho = 1,79 \text{ г/см}^3$, $\phi = 24^\circ$, $c = 3 \text{ кПа}$, $E = 27 \text{ МПа}$. Материнская порода сложена мерзлым метапесчаником с характеристиками: $\rho = 2,65 \text{ г/см}^3$, $\phi = 51,8^\circ$, $c = 2,350 \text{ МПа}$, $E = 27,6 \text{ ГПа}$. В запас прочности для засыпки были приняты следующие величины из таблицы А5 СП 22.13330.2016 [6] с нормативными значениями характеристик элювиальных песков, рекомендованные для древеснистых песков при коэффициенте пористости $e = 0,65$, $\phi = 28^\circ$, $c = 39 \text{ кПа}$, $E = 24 \text{ МПа}$.

Были рассмотрены две расчетные схемы (рис. 3, 4). В первой схеме мощность курума 3 м, а во второй – 6 м. Смещение курума, заданное в «запас прочности», как минимум на порядок больше, чем принятое в проекте годовое смещение курума (от 30 до 40 см). Это смещение задается как смещение передней кромки курума путем использования функции «Line displacements». Угол наклона склона принят 7° .

В результате расчетов получены изополя смещения грунтов основания и фундамента сооружения при заданном перемещении тела курума по склону.

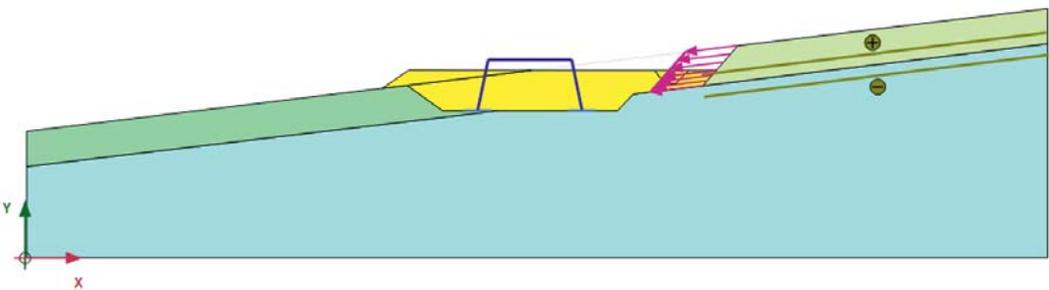


Рис. 3. Расчетная схема 1. Мощность активной толщи курума 3 м
Fig. 3. Calculation schematic 1. Thickness of the active stone run layer amounting to 3 m

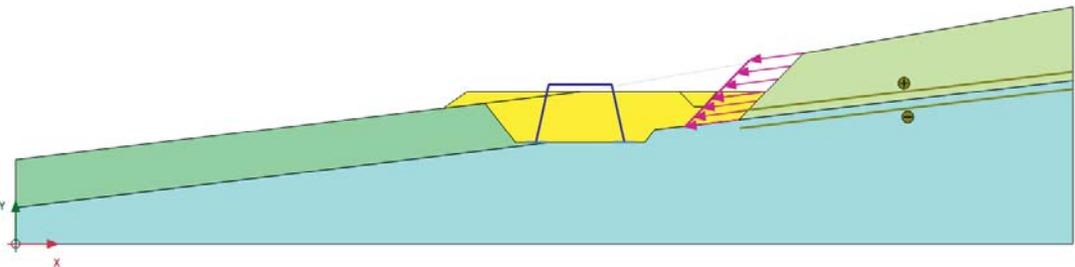


Рис. 4. Расчетная схема 2. Мощность активной толщи курума 6 м
Fig. 4. Calculation schematic 2. Thickness of the active stone run layer amounting to 6 m

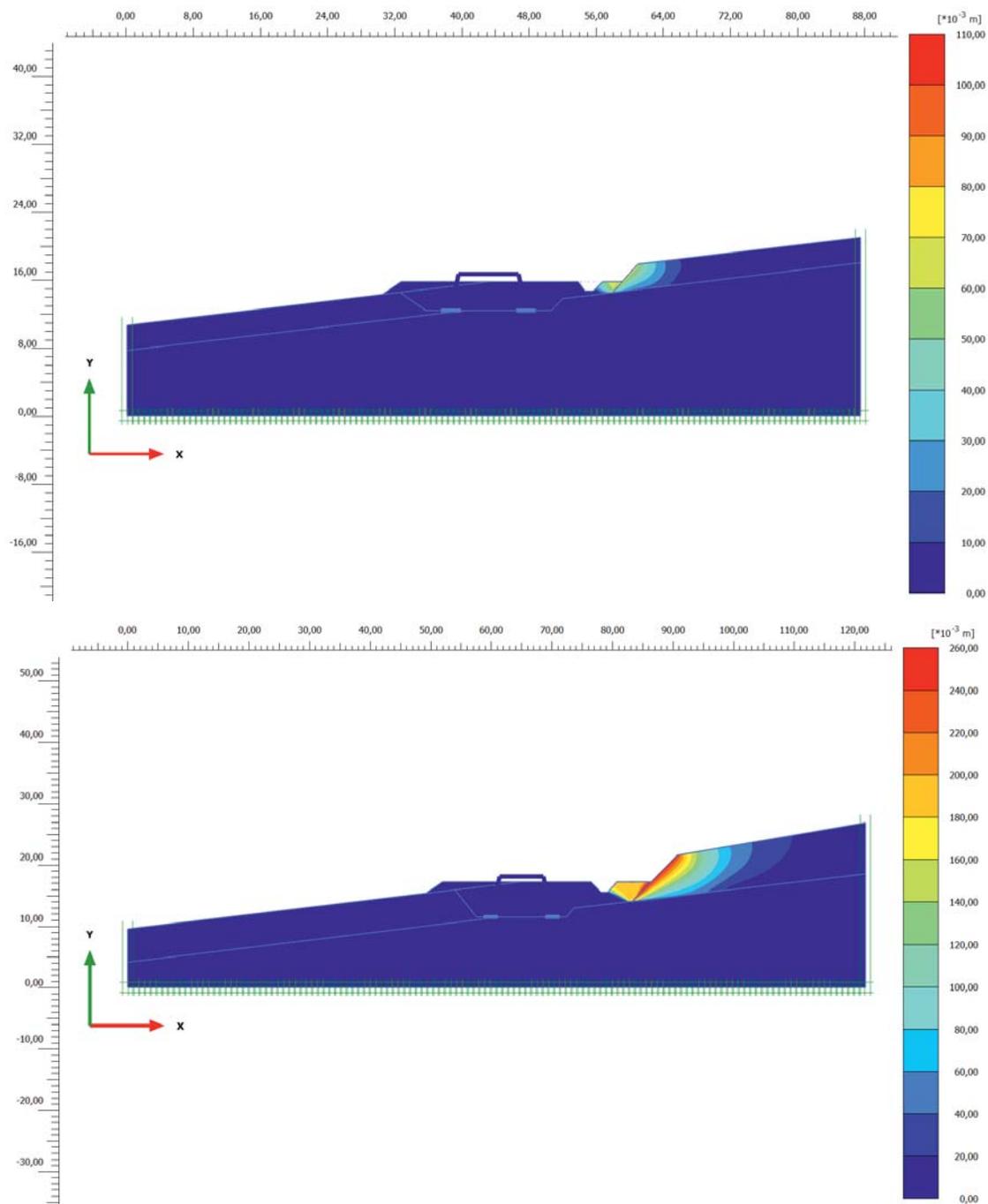


Рис. 5. Полученные в результате расчетов изополя, отражающие влияние курума на засыпку буферной зоны
Fig. 5. Calculated isofields showing the stone run effect on the buffer zone backfill

На рис. 5 показаны полученные в результате расчета изополя.

Результаты расчета сводятся к тому, что массив грунта засыпки остается в целом неподвижен или получает очень малые смещения, на стыке курума с засыпкой возникает «смятие» засыпки, которое представляет собой образование клина пассивного давления. Из этого следует, что, если стойки фундаментов отделены от надвигающейся грани курума достаточным расстоянием (порядка 10 м), давление курума на опору ЛЭП не передается. А в случае если это расстояние менее 10 м, то предусматривается откопка рва в обратной засыпке.

Существует и другой вариант инженерной защиты от курумов, например устройство грунтовых дамб. Такой метод эффективен при большой мощности активной части курума и высокой скорости перемещения обломочного материала, а также при необходимости комплексной защиты сооружений не только от курума, но и от лавин. Однако выполнение зон безопасности перед фундаментами опор остается наиболее оптимальным и наименее затратным способом инженерной защиты от возможных подвижек курумного чехла. Данный способ обеспечивает приемлемый уровень безопасности, полностью исключая боковую нагрузку на фундаменты, и дает определенный запас по времени для принятия более радикальных мер в случае необходимости.

Вывод

Пример ГМК «Удоканская медь» указал на то, что вопрос учета влияния опасного криогенного процесса курумообразования при проектировании – крайне не исследованный на практике и нуждается в изучении для дальнейшего закрепления методов инженерной защиты от курумов в нормативной документации. После реализации принятых проектных решений по опорам ВЛ на объекте ГМК «Удоканская медь» планируется продолжить сбор и анализ информации по эффективности выбранных методов защиты. На основе полученных данных будут сделаны выводы и сформулированы рекомендации для нормативных документов.

Список литературы

1. *Алексеев В.Р.* Курумы – феномен криосферы / В.Р. Алексеев // Наука и техника в Якутии. – 2018. – №1 (34). – С. 72–88.
2. *Говорушко С.М.* Курумный морфолитогенез / С.М. Говорушко. – Владивосток: ДВНЦ РАН, 1986. – 120 с.
3. Курумы гольцового пояса гор / Н.Н. Романовский, А.И. Тюрин, Д.О. Сергеев [и др.]. – Новосибирск: Наука, 1989. – 152 с.
4. *Симонов Ю.Г.* Курумы Восточного Забайкалья, их происхождение и развитие / Ю.Г. Симонов // Проблемы регионального зимоведения. Записки Забайкальского отделения Географического общества СССР. – Чита, 1966. – Вып. 1. – С. 37–38.
5. *Тюрин А.И.* Мерзлотно-фациальный анализ курумов / А.И. Тюрин, Н.Н. Романовский, Н.Ф. Полтев. – Москва: Наука, 1982. – 150 с.
6. СП 22.13330.2016. Основания зданий и сооружений. Актуализированная редакция СНиП 2.02.01-83*: утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 16 декабря 2016 г. N 970/пр: введен в действие с 17 июня 2017 г. – Москва, 2016. – 240 с.

References

1. *Alekseev V.R.* Kurums – a phenomenon of the cryosphere. *Nauka i tekhnika v Yakutii = Science and Technology in Yakutia*. 2018;(1):72–88. (in Russian).
2. *Govorushko S.M.* Kurum morpholithogenesis. Vladivostok: DVNC RAS; 1986. (in Russian).
3. *Romanovsky N.N., Tyurin A.I., Sergeev D.O., Afonskaya L.G., Boykov S.A., Volkova V.P., et al.* Kurums of the mountain range. Novosibirsk: Nauka; 1989. (in Russian).
4. *Simonov Y.G.* Kurums of Eastern Transbaikalia, their origin and development. In: Problems of regional wintering. Notes of Zabaikalsky Branch of Geographical Society of the USSR. Vol. 1. Chita; 1966. p. 37–38. (in Russian).
5. *Tyurin A.I., Romanovsky N.N., Poltev N.F.* Permafrost-facial analysis of kurums. Moscow: Nauka; 1982. (in Russian).
6. SP 22.13330.2016. Foundations of buildings and structures. Updated edition of SNiP 2.02.01-83*. Moscow; 2016. (in Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Дмитрий Владимирович Чернятин, инженер-геолог лаборатории механики опасных природно-техногенных процессов и разработки методов инженерной защиты № 18 НИИОСП им. Н.М. Герсеевича АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: Chernyatin94@mail.ru
тел.: +7 (926) 129-29-80

Dmitriy V. Chernyatin, Geological Engineer, Laboratory for Mechanics of Hazardous Natural and Man-made Processes and Development of Engineering Protection Methods No. 18, Research Institute of Bases and Underground Structures (NIIOSP) named after N.M. Gersevanov, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: Chernyatin94@mail.ru
tel.: +7 (926) 129-29-80

УДК 001.894.2:624.15

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-103-114](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-103-114)

МЕТОД СТАБИЛИЗАЦИИ ГРУНТОВОГО ОСНОВАНИЯ ТЕРМОРЕГУЛИРУЕМОЙ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ФУНДАМЕНТНОЙ ПЛАТФОРМЫ НА ВЕЧНОМЕРЗЛОМ ГРУНТЕ

А.С. КЛИМОВ[✉], канд. техн. наук

И.И. ТЕРЕХОВА, канд. техн. наук

О.Л. КЛИМОВА

Е.В. ЧУМАКОВА

ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет», пр. Свободный, д. 79, г. Красноярск, 660041, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Вследствие глобального потепления климата происходит оттаивание вечномерзлых грунтов в северных регионах, а также увеличиваются ветровые и снеговые нагрузки на здания, сооружения и их фундаментные основания. Скопления снеговых осадков создают теплоизолирующий слой, препятствующий замораживанию грунта в холодный период года, а в теплый период года подвергает грунт влагонасыщению, что приводит к деформированию опорных конструкций зданий и сооружений.

Целью исследования является усовершенствование пространственной железобетонной фундаментной платформы жилого здания на вечномерзлом грунте путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы с использованием системы автоматического управления и разработка терморегулируемой оболочки железобетонной фундаментной платформы с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения сильного снегопереноса в продуваемое подполье.

Материалы и методы. Для исследования системы автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы использовалась печатная плата Arduino Uno.

Результаты. На основе применяемого оборудования разработана структурная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта. Для изучения эффективности применения системы автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы, создана модель, реализованная в среде динамического моделирования технических систем SimInTech.

Выводы. Предложено новое техническое решение – терморегулируемая оболочка, выполненная из деревянных клееных панелей в виде модуля повышенной индустриализации, образующего с железобетонными плитами замкнутое пространство, причем во всех деревянных клееных панелях, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзийные решетки с электроприводом. Запатентована пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномерзлом грунте.

Ключевые слова: фундаментная платформа, вечномерзлые грунты, здания, устройства термостабилизации грунтов, вентилируемые подполья

Для цитирования: Климов А.С., Терехова И.И., Климова О.Л., Чумакова Е.В. Метод стабилизации грунтового основания терморегулируемой пространственной железобетонной фундаментной платформы

на вечномёрзлом грунте // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 103–114. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-103-114](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-103-114)

Вклад авторов

Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

METHOD FOR SOIL BASE STABILIZATION USING THE THERMALLY CONTROLLED SPATIAL REINFORCED CONCRETE FOUNDATION PLATFORM IN THE PERMAFROST SOIL

A.S. KLIMOV✉, Cand. Sci. (Engineering)

I.I. TEREHOVA, Cand. Sci. (Engineering)

O.L. KLIMOVA

E.V. CHUMAKOVA

Siberian Federal University, Svobodny Ave., 79, Krasnoyarsk, 660041, Russian Federation

Abstract

Introduction. As a result of the global warming, the thawing of permafrost soils in the northern regions occurs and leads to naturally increasing wind and snow loads on the buildings, structures, and their foundations. Snow accumulations create a heat-insulating layer preventing the soil freezing in the cold period of the year and moisturize the soil in the warm period, which leads to the deformation of the support structures of buildings and civil engineering works.

Aim. The study aims at the advancement of the spatial reinforced concrete foundation platform of a residential building on the permafrost soil by providing the direct cooling of the lower reinforced concrete slab of the foundation platform using the system of automatic control, as well as at the development of the thermally controlled shell of reinforced concrete foundation platform with the possibility of the resistance to wind currents and prevention of the massive snow transfer into the ventilated underfloor space.

Methods and materials. The system of automatic control of the soil cooling process due to the direct cooling of the lower reinforced concrete slab of the foundation platform was studied using the Arduino Uno printed circuit board.

Results. Based on the used equipment, the block diagram of the experimental setup was developed for recording variations in the air and permafrost soil temperature. In order to study the feasibility of the system for automatic control of the soil cooling process due to the direct cooling of the lower reinforced concrete slab of the foundation platform, a model was created and implemented in the SimInTechs environment for the dynamic modeling of technical systems.

Conclusions. As a result, the authors proposed a new technical solution represented by the thermally controlled shell, made of laminated timber in the form of a highly industrialized module forming the enclosed space with the reinforced concrete slabs. In addition, all laminated timber panels, installed with the possibility of resisting to wind currents and preventing the snow transfer, contain the electrically driven adjustable louvered grilles. The spatial reinforced concrete foundation platform on permafrost soil is patented.

Keywords: foundation platform, permafrost soils, buildings, soil thermal stabilization devices, ventilated underfloor space

For citation: Klimov A.S., Terehova I.I., Klimova O.L., Chumakova E.V. Method for soil base stabilization using the thermally controlled spatial reinforced concrete foundation platform in the permafrost soil. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 103–114 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-103-114](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-103-114)

Author contribution statements

All authors have made an equal contribution to the preparation of the article.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Вследствие глобального потепления климата происходит оттаивание вечномёрзлых грунтов в зоне экстремального северного региона [1–3]. Данная проблема выражается в увеличении ветровых и снеговых нагрузок на здания, сооружения и их фундаментные основания (рис. 1), отличающихся от нормативных значений, представленных в работе [4].

Большие скопления снеговых осадков создают теплоизолирующий слой, препятствующий замораживанию грунта. При естественных условиях верхний слой вечномёрзлых земель подвергается регулярным температурным изменениям, а именно: испытывает летом – влагонасыщение, а зимой – пучение грунта, что приводит к деформированию опорных конструкций зданий и сооружений.

Обзор литературы

«По данным современных изысканий температуры грунта на глубине 10–15 метров могут составлять от +4 до +6 °С и отличаются от установленных в 70–80-х годах на 6–10 °С. Расчет оценки растепления вечномёрзлых грунтов представлен в работе [5]. Согласно



Рис. 1. Скопление снега во дворе (слева) и в вентилируемом подполье (справа) жилого здания в г. Норильске
Fig. 1. Snow accumulation in the yard (left) and in the ventilated underfloor space (right) of a residential building in the city of Norilsk

предварительным расчетам во второй половине XXI века мерзлотный слой полностью деградирует» [5].

Поэтому упрочнение грунта в зоне многолетней мерзлоты под фундаментом жилых зданий является одной из наиболее актуальных и одновременно трудно решаемых задач в условиях северного региона. В настоящее время большое внимание уделяется поиску новых перспективных решений по стабилизации вечномерзлого грунтового основания [6–8]. Данные задачи привели к проектным решениям и созданию многих систем и устройств [9–14].



Рис. 2. Печатная плата Arduino Uno
 Fig. 2. Arduino Uno printed circuit board

Таблица 1

Описание печатной платы Arduino Uno

Table 1

Description of the Arduino Uno Printed Circuit Board

Параметры	Значения
Рабочее напряжение	5 В
Входное напряжение (рекомендуемое)	7–12 В
Входное напряжение (предельное)	6–20 В
Микроконтроллер	ATmega 328
Аналоговые входы	6
Постоянный ток для вывода 3.3 В	50 мА
ОЗУ	2 Кб (ATmega328)
EEPROM	1 Кб (ATmega328)
Цифровые входы/ выходы	14 (шесть из которых могут использоваться как выходы ШИМ)
Флеш-память	32 Кб (ATmega328) из которых 0,5 Кб используется для загрузчика
Тактовая частота	16 МГц

Цель исследования

С учетом приведенных проблем целью исследования является усовершенствование пространственной железобетонной фундаментной платформы жилого здания на многолетне-мерзлом грунте. Задачами исследований являются моделирование процесса охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы для изучения эффективности с использованием системы автоматического управления (САУ) и разработка терморегулируемой оболочки железобетонной фундаментной платформы с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения сильного снегопереноса в продуваемое подполье.

Материалы и методы

Поставленная цель решалась методом комплексного подхода, включающего в себя анализ и обобщение данных научно-технической литературы по проблеме исследования [6–8].

Для исследования САУ процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы использовалась печатная плата Arduino Uno (рис. 2).

Для работы необходимо подключить платформу к ПК при помощи кабеля USB, либо подключить питание посредством адаптера AC/DC или батареи. Описание печатной платы Arduino Uno представлено в табл. 1.

Результаты исследования

На основе применяемого оборудования разработана структурная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта (рис. 3).

Построение модели и моделирование САУ процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы реализовано в среде динамического моделирования технических систем SimInTech отечественного разработчика. По характеристикам данных предложенный программный комплекс схожий с иностранными программами SumSim, Simulink и обладает следующими преимуществами: эффективные численные методы, практичный редактор структурных схем, встроенный язык программирования и широкая библиотека типовых блоков – позволяют осуществить модели практически любой степени сложности [15].

Рассмотрим моделирование процесса охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы (рис. 4) со следующими граничными условиями, заданными экспериментальным путем: температура воздуха окружающей среды в продуваемом подполье $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$; температура массива вечномерзлого грунта под нижней железобетонной плитой фундаментной платформы $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При повышении температуры воздуха внутри пространственной железобетонной фундаментной платформы выше $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ время формирования команды электроприводу о закрытии жалюзийных решеток и создания замкнутого пространства составляет 6,8 с (рис. 5) при параллельной работе с термоэлектрическими модулями.

При повышении температуры массива грунта под нижней железобетонной плитой фундаментной платформы выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ время формирования команды о включении

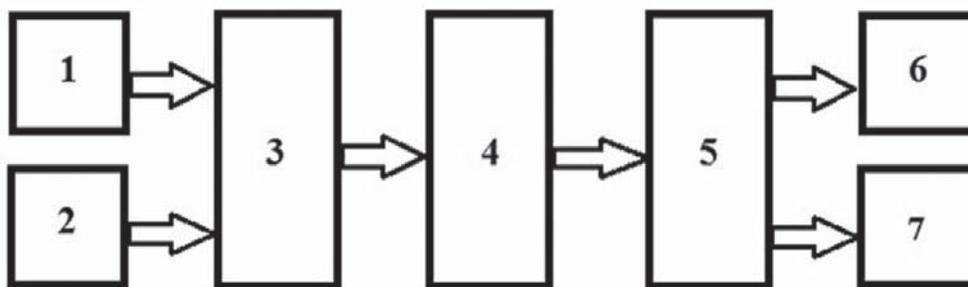


Рис. 3. Структурная схема экспериментальной установки:

- 1 – датчик температуры воздуха окружающей среды, установленный в продуваемом подполье;
- 2 – датчики температуры, установленные в массиве вечномерзлого грунта по периметру платформы;
- 3 – устройство ввода; 4 – блок перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ);
- 5 – устройство вывода; 6 – электропривод регулируемых жалюзийных решеток; 7 – термоэлектрические модули

Fig. 3. Block diagram of the experimental setup:

- 1 – ambient air temperature sensor installed in the ventilated underfloor space;
- 2 – temperature sensors installed in the permafrost soil along the perimeter of the platform;
- 3 – input device; 4 – reprogrammable read-only memory unit (RRROM); 5 – output device; 6 – electric drive of adjustable louvered grilles; 7 – thermoelectric modules

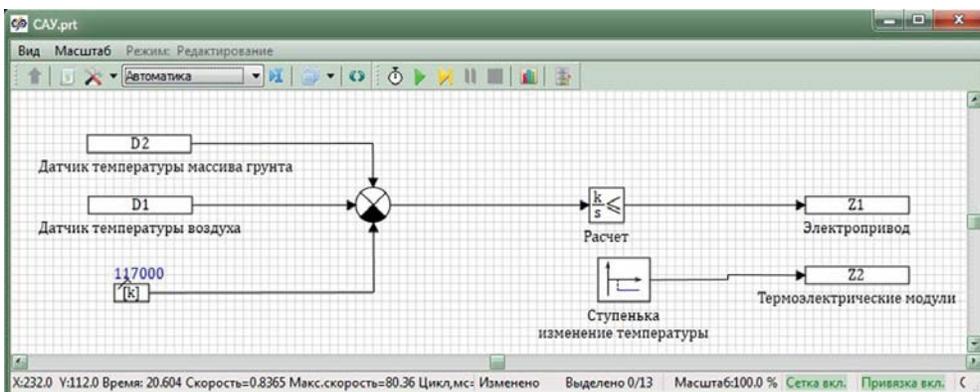


Рис. 4. Модель ориентации термоэлектрических модулей и электропривода к температурным изменениям

Fig. 4. Model of the orientation of thermoelectric modules and electric drive to temperature variations



Рис. 5. Время формирования команды электроприводу
 Fig. 5. Time of generating command to the electric drive

термоэлектрических модулей для охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы и замораживания под ней массива многолетнемерзлых грунтов составляет 2,2 с (рис. 6) при параллельной работе с электроприводом жалюзийных решеток.

В результате моделирования выполнен процесс охлаждения грунтов путем включения термоэлектрических модулей для охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы и стабилизации массива многолетнемерзлых грунтов за 2,2 с, и формирования команды электроприводу о закрытии жалюзийных решеток для создания замкнутого пространства за 6,8 с.

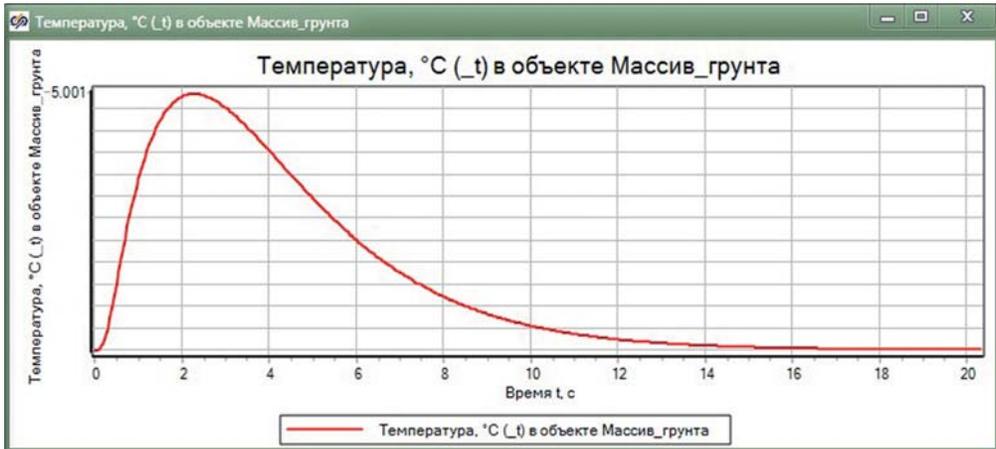


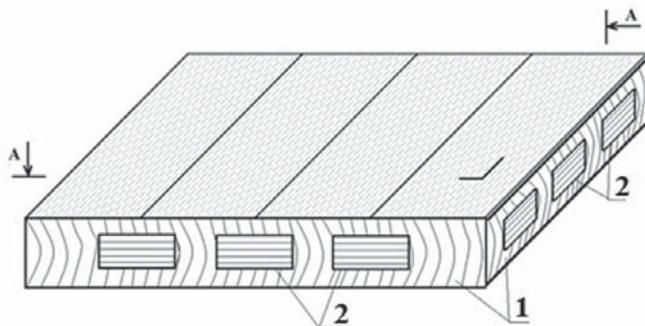
Рис. 6. Время формирования команды термоэлектрическим модулям
Fig. 6. Time of generating command to thermoelectric modules

Технической проблемой, решаемой изобретением [16], является повышение эффективности процесса охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы с использованием САУ и предотвращения сильного снегопереноса в продуваемое подполье [16].

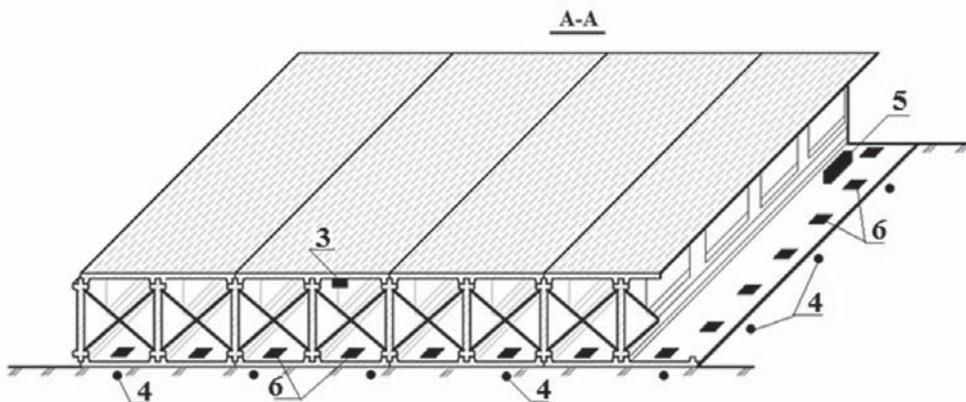
Согласно изобретению [16], новым является то, что терморегулируемая оболочка выполнена из деревянных клееных панелей в виде модуля повышенной индустриализации, образующий с железобетонными плитами замкнутое пространство, причем во всех деревянных клееных панелях, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзийные решетки с электроприводом. Предложенное техническое решение позволяет существенно уменьшить большие объемы воздухопроницаемости нагретых потоков в теплый период года в продуваемое подполье, сохраняет отрицательную температуру внутри замкнутого пространства, что снижает риски растепления массива грунта в зоне вечной мерзлоты. В холодный и переходный периоды года терморегулируемая оболочка фундаментной платформы позволяет холодным потокам воздуха попадать во внутрь через регулируемые жалюзийные решетки для естественного охлаждения массива грунта, а также является преградой для снежных отложений в продуваемом подполье.

На рис. 7 приведена терморегулируемая пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномерзлом грунте. На рис. 7, фиг. 1 схематично показан общий вид; на рис. 7, фиг. 2 схематично показан общий вид, разрез А-А показан на рис. 7, фиг. 1.

«Терморегулируемая пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномерзлом грунте включает объединенные между собой верхние и нижние плиты, которые соединены железобетонными фермами раскосными или безраскосными или балками, между фермами или балками в поперечном направлении установлены крестовые связи, а между верхними и нижними плитами образовано вентилируемое во всех направлениях продуваемое подполье. По периметру платформы установлены ограждающие деревянные клееные панели 1, образующие с железобетонными плитами замкнутое пространство. При этом во всех



Фиг. 1



Фиг. 2

Рис. 7. Терморегулируемая пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномёрзлом грунте [16]:

1 – деревянные клееные панели; 2 – регулируемые жалюзиные решетки; 3 – датчик температуры воздуха окружающей среды, установленный в продуваемом подполье; 4 – датчики температуры, установленные в массиве вечномёрзлого грунта по периметру платформы; 5 – электропривод регулируемых жалюзиных решеток; 6 – термоэлектрические модули

Fig. 7. Thermally-controlled spatial reinforced concrete foundation platform on the permafrost soil [16]:

1 – laminated timber panels; 2 – adjustable louvered grilles; 3 – ambient air temperature sensor installed in the ventilated underfloor space; 4 – temperature sensors installed in the permafrost soil along the perimeter of the platform; 5 – electric drive of adjustable louvered grilles; 6 – thermoelectric modules

деревянных клееных панелях 1, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзиные решетки 2. Кроме того, пространственная железобетонная фундаментная платформа содержит систему автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы, включающую датчик температуры воздуха окружающей среды 3, установленный в продуваемом подполье, датчики температуры 4, установленные в массиве грунта по периметру платформы, связанное с датчиками устройство ввода 5, для преобразования аналогового сигнала в цифровой, блок перепрограммируемого постоянно запоминающего устройства (ППЗУ) 6, связанный с устройством ввода 5 и с устройством вывода 7, для преобразования цифрового сигнала в аналоговый, а устройство вывода 7 связано с электроприводом 8 регулируемых

жалюзийных решеток 2 и с термоэлектрическими модулями 9, в виде батареи элементов Пельтье, установленными по периметру на поверхности нижней железобетонной плиты фундаментной платформы в замкнутом пространстве продуваемого подполья» [16].

Стабилизация грунтового основания терморегулируемой пространственной железобетонной фундаментной платформой на вечномёрзлом грунте решается следующим образом. «При повышении температуры воздуха окружающей среды выше $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ сигнализирует датчик температуры 3, который подает сигнал на устройство ввода 5, преобразующее сигнал из аналогового в цифровой, и далее в блок ППЗУ 6. При повышении температуры массива грунта под нижней железобетонной плитой фундаментной платформы выше $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ сигнализируют датчики температуры 4, кото-

рые подают сигналы на устройство ввода 5, преобразующее сигналы из аналоговых в цифровые, и далее в блок ППЗУ 6. Блок ППЗУ 6 выполняет расчетные операции в соответствии с алгоритмом, а именно сравнивает поступившие цифровые сигналы из устройства ввода 5 с запрограммированными в ППЗУ 6 оптимальными температурами многолетнемерзлых грунтов и оптимальной температурой воздуха окружающей среды. При несоответствии оптимальным температурам многолетнемерзлых грунтов блок ППЗУ 6, в свою очередь, через устройство вывода 7, которое преобразует цифровой сигнал в аналоговый, подает сигнал о включении термоэлектрических модулей 9 для охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы и замораживания под ней массива многолетнемерзлых грунтов. Также при несоответствии оптимальной температуре воздуха окружающей среды блок ППЗУ 6 подает сигнал электроприводу 8 о закрытии регулируемых жалюзийных решеток 2 для создания замкнутого пространства и сохранения отрицательной температуры внутри пространственной железобетонной фундаментной платформы» [16].

Расчетное обоснование эффективности предложенного метода стабилизации грунтового основания выражено в процентах понижения температуры массива грунта при текущем охлаждении нижней железобетонной плиты фундаментной платформы. Входными данными для определения процента получаемой температуры массива грунта является сигнал о состоянии температуры нижней железобетонной плиты фундаментной платформы. Расчет выполнен в блоке программирования (рис. 8).

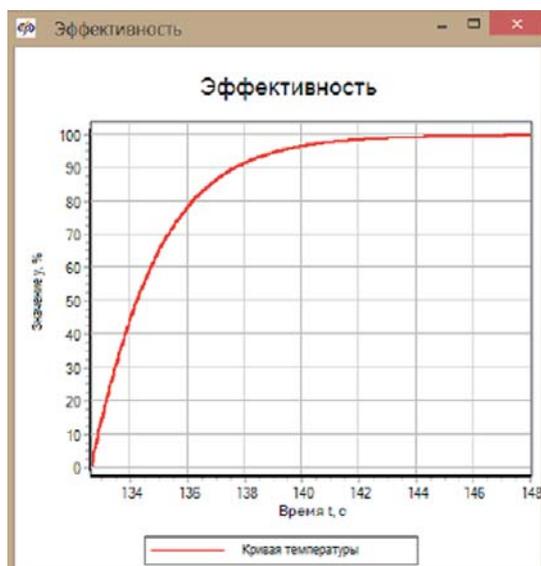


Рис. 8. Эффективность метода стабилизации грунтового основания

Fig. 8. Effectiveness of the soil base stabilization method

Выводы и заключение

1. Разработана структурная схема экспериментальной установки для фиксирования изменения температур воздуха окружающей среды и вечномерзлого грунта.

2. В программном комплексе SimInTech реализована модель системы автоматического управления процессом охлаждения грунтов путем обеспечения непосредственного охлаждения нижней железобетонной плиты фундаментной платформы.

3. Предложено новое техническое решение – терморегулируемая оболочка, выполненная из деревянных клееных панелей в виде модуля повышенной индустриализации, образующего с железобетонными плитами замкнутое пространство, причем во всех деревянных клееных панелях, установленных с возможностью восприятия ветровых потоков и предотвращения снегопереноса, встроены регулируемые жалюзийные решетки с электроприводом.

Список литературы

1. *Jafarov E.E.* Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset / E.E. Jafarov, S.S. Marchenko, V. E. Romanovsky // *The Cryosphere*. – 2012. – Vol. 6, no. 3. – P. 613–624.
2. *Rotta Loria A.F.* A non-linear constitutive model for describing the mechanical behaviour of frozen ground and permafrost / A.F. Rotta Loria, B. Frigo, B. Chiaia // *Cold Regions Science and Technology*. – 2017. – Vol. 133. – P. 63–69. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.010>.
3. *Ran Y.* Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau / Y. Ran, X. Li, G. Cheng // *Cryosphere*. – 2018. – Vol. 2, no. 12. – P. 595–608. <https://doi.org/10.5194/tc-12-595-2018>.
4. *Амельчугов С.П.* Проблемы безопасности зданий арктического региона Восточной Сибири / С.П. Амельчугов, И.С. Инжутов, А.С. Климов [и др.] // *Актуальные проблемы обеспечения пожарной безопасности и защиты от чрезвычайных ситуаций. Сборник статей по материалам Всероссийской научно-практической конференции 26 апреля 2019 года, г. Железногорск, Россия*. – 2019. – С. 166–172.
5. *Nicolisky D.J.* Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost / D.J. Nicolisky, V.E. Romanovsky, G.G. Panteleev // *Cold Regions Science and Technology*. – 2009. – Vol. 55, no. 1. – P. 120–129.
6. *Филимонов М.Ю.* Моделирование термостабилизации грунта при эксплуатации инженерных объектов в условиях арктических и субарктических регионов / М.Ю. Филимонов, Н.А. Ваганова // *Экология. Экономика. Информатика. Серия: Системный анализ и моделирование экономических и экологических систем*. – 2017. – Т. 1. – № 2. – С. 391–401.
7. *Абу-Хасан М.С.* Термостабилизация вечномерзлых грунтов при возведении сооружений в северных климатических зонах / М.С. Абу-Хасан, В.В. Егоров, Л.П. Куправа, Д.Г. Чарник // *БСТ: Бюллетень строительной техники*. – 2019. – № 4 (1016). – С. 40–42.
8. *Суриков В.И.* Исследования условий эксплуатации устройств термостабилизации грунтов с учетом воздействия технических объектов на многолетнемерзлые грунты / В.И. Суриков, А.А. Коротков, Е.А. Мельникова // *Нефтяное хозяйство*. – 2017. – № 8. – С. 116–119.
9. *Inzhutov I.S.* A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils / I.S. Inzhutov, V.I. Zhadanov, M.Yu. Semenov, A.S. Klimov, S.P. Amelchugov // *E3S Web of Conferences*. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE 2018. – 2019. – No. 110. – P01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001019>.
10. *Inzhutov I.S.* Research of permafrost soil thawing under the structural foundation platform / I.S. Inzhutov, V.I. Zhadanov, M.Y. Semenov, S.P. Amelchugov [et al.] // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Novosibirsk, Russia. 2018. – No. 1(456). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012046>
11. *Belash T.A.* Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds / T.A. Belash, T.V. Ivanova // *Magazine of civil engineering*. – 2020. – No. 1(93). – P. 50–59. <https://doi.org/10.18720/MCE.93.5>

12. Патент РФ 38789. Сборная пространственная железобетонная фундаментная платформа для строительства многоэтажных зданий в особых грунтовых условиях и сейсмичности / Н.П. Абовский и др.; патентообл.: Красноярская государственная архитектурно-строительная академия. Заявл. 2004107322/22, 11.03.2004, опубл. 10.07.2004. Бюл. № 19.
13. Патент РФ 181936. Ограждающая конструкция вентилируемого подполья / А.С. Климов, М.Ю. Семенов, С.П. Амелчугов, И.С. Инжутов; патентообл.: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Заявл. 2018112898, 09.04.2018., опубл. 27.07.2018. Бюл. № 21.
14. Патент РФ 2728004. Терморегулируемый ограждающий модуль вентилируемого подполья / А.С. Климов, А.С. Степанян; патентообл.: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Заявл. 2020105067, 03.02.2020, опубл. 28.07.2020. Бюл. № 22.
15. Справочная система SimInTech [Электронный ресурс]. – URL: https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html (дата обращения: 22.01.2022).
16. Патент РФ 2706495. Пространственная железобетонная фундаментная платформа на вечномёрзлом грунте / А.С. Климов, М.Ю. Семенов, С.П. Амелчугов, И.С. Инжутов; патентообл.: ФГАОУ ВО «Сибирский федеральный университет». Заявл. 2019119260, 18.06.2019, опубл. 19.11.2019. Бюл. № 32.

References

1. Jafarov E.E., Marchenko S.S., Romanovsky V.E. Numerical modeling of permafrost dynamics in Alaska using a high spatial resolution dataset. *The Cryosphere*. 2012;6(3):613–624. <https://doi.org/10.5194/tc-6-613-2012>
2. Rotta Loria A.F., Frigo B., Chiaia B.A. non-linear constitutive model for describing the mechanical behaviour of frozen ground and permafrost. *Cold Regions Science and Technology*. 2017;133:63–69. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2016.10.010>
3. Ran Y., Li X., Cheng G. Climate warming over the past half century has led to thermal degradation of permafrost on the Qinghai-Tibet Plateau. *Cryosphere*. 2018;2(12):595–608. <https://doi.org/10.5194/tc-12-595-2018>
4. Amelchugov S.P., Inzhutov I.S., Klindukh N.Yu., Arkhipov I.N., Klimov A.S., Gumennaya E.Yu., et al. Problems of building safety in the Arctic region of Eastern Siberia. In: Actual problems of fire safety and protection from emergencies. Collection of articles based on the materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference on April 26, 2019, Zheleznogorsk, Russia. Zheleznogorsk: Siberian Fire and Rescue Academy; 2019, p. 166–172 (in Russian).
5. Nicolsky D.J., Romanovsky V.E., Panteleev G.G. Estimation of soil thermal properties using in-situ temperature measurements in the active layer and permafrost. *Cold Regions Science and Technology*. 2009;55(1):120–129. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2008.03.003>
6. Filimonov M.Yu., Vaganova N.A. Modeling of thermal stabilization of soil during the operation of engineering facilities in the Arctic and subarctic regions. *Ekologiya. Ekonomika. Informatika. Seriya: Sistemnyi analiz i modelirovanie ekonomicheskikh i ekologicheskikh sistem [Ecology. Economy. Computer science. Series: System analysis and modeling of economic and ecological systems]*. 2017;1(2):391–401 (in Russian).
7. Abu-Hassan M.S., Egorov V.V., Kuprava L.R., Charnik D.G. Thermal stabilization of permafrost soils during the construction of structures in northern climatic zones. *BST: Byulleten' stroitel'noi tekhniki [BST: Bulletin of construction equipment]*. 2019;(4):40–42 (in Russian).
8. Surikov V.I., Korotkov A.A., Melnikova E.A. Studies of operating conditions of soil thermal stabilization devices taking into account the impact of technical objects on permafrost soils. *Neftyanoe khozaystvo [Oil industry]*. 2017;(8):116–119 (in Russian).
9. Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Semenov M.Yu., Klimov A.S., Amelchugov S.P. A comparative analysis of foundation design solutions on permafrost soils. *E3S Web of Conferences*. 2018 International Science Conference on Business Technologies for Sustainable Urban Development, SPbWOSCE – 2018. 2019;110;P01019. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911001019>.
10. Inzhutov I.S., Zhadanov V.I., Nazirov R.A., Servatinskii V.V., Semenov M.Yu., Amelchugov S.P. Research of permafrost soil thawing under the structural foundation platform. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018;456. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/456/1/012046>
11. Belash T.A., Ivanova T.V. Earthquake resistance of buildings on thawing permafrost grounds. *Magazine of civil engineering*. 2020;(1):50–59. <https://doi.org/10.18720/MCE.93.5>

- 12.** *Abovskii N.P., Abovskaya S.N., Matyushenko V.A., Sapkalov V.I., Morozov S.V., Pishutina G.V., Temerova A.S.* Prefabricated spatial reinforced concrete foundation platform for the construction of multi-storey buildings in special ground conditions and seismicity. Patent of the Russian Federation no. 38789. Publ. date 10.07.2004 (in Russian).
- 13.** *Klimov A.S., Semenov M.Yu., Amelchugov S.P., Injutov I.S.* Enclosing structure of the ventilated underground. Patent of Russian Federation no. 181936. Publ. date 27.07.2018 (in Russian).
- 14.** *Klimov A.S., Stepanyan A.S.* Thermoregulated enclosing module of the ventilated underground. Patent of Russian Federation no. 2728004. Publ. date no. 28.07.2020 (in Russian).
- 15.** SimInTech reference system [Internet]. Available at: https://help.simintech.ru/#o_simintech/o_simintech.html (accessed: 22 January 2022) (in Russian).
- 16.** *Klimov A.S., Semenov M.Yu., Amelchugov S.P., Injutov I.S.* Spatial reinforced concrete foundation platform on permafrost soil. Patent of Russian Federation no. 2706495. Publ. date 19.11.2019 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Алексей Сергеевич Климов , канд. техн. наук, доцент, доцент инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: Klimovas_2011@mail.ru
тел.: +7 (904) 893-49-61

Alexey S. Klimov , Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor, Associated Professor of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: Klimovas_2011@mail.ru
tel.: +7 (904) 893-49-61

Ирина Ивановна Терехова, канд. техн. наук, доцент инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: iterechowa@sfu-kras.ru
тел.: +7 (391) 206-28-16

Irina I. Terehova, Cand. Sci. (Engineering), Associated Professor of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: iterechowa@sfu-kras.ru
tel.: +7 (391) 206-28-16

Оксана Леонидовна Климова, магистрант инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: oksana_88@mail.ru
тел.: +7 (391) 206-27-34

Oksana L. Klimova, graduate student of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: oksana_88@mail.ru
tel.: +7 (391) 206-27-34

Екатерина Витальевна Чумакова, магистрант инженерно-строительного института, Сибирский федеральный университет, Красноярск
e-mail: katyasprouse@yandex.ru
тел.: +7 (391) 206-27-34

Ekaterina V. Chumakova, graduate student of the Institute of Civil Engineering, Siberian Federal University, Krasnoyarsk
e-mail: katyasprouse@yandex.ru
tel.: +7 (391) 206-27-34

 Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 620.197.4

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-115-127](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127)

К ВОПРОСУ О ПОВЫШЕНИИ БИОСТОЙКОСТИ БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ МОСТОВЫХ ОПОР

С.А. ЛОГИНОВА^{1✉}, канд. техн. наукИ.Н. ГОГЛЕВ²¹ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет», Московский пр., д. 88, Ярославль, 150023, Российская Федерация²ФГБОУ ВО «Ивановский государственный политехнический университет», Шереметевский пр., д. 21, Иваново, 150300, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В статье рассматриваются аспекты влияния биологической коррозии бетона на долговечность бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений. Рассмотрены примеры реальных объектов, на которых выявлены участки совместного влияния биокоррозии и других видов коррозии бетона.

Цель. Изучение процессов формирования биообрастания на мостовых опорах и механизмов образования биомассы на поверхности бетона в зависимости от режима движения жидкости в речном потоке.

Материалы и методы. Рассмотрена зависимость числа Рейнольдса от температуры и коэффициента кинематической вязкости воды в реке. Разработана и рассчитана физико-математическая модель процесса массопереноса при биокоррозии, происходящего в условиях обтекания двурядной системы опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса.

Результаты. Благодаря разработанной физико-математической модели можно рассчитывать срок службы железобетонных опор мостовых сооружений и определять «остаточную» долговечность, а также предложить сроки очистки поверхности бетона от биоотложений.

Выводы. Таким образом, по результатам проведенных исследований выявлена зависимость влияния биокоррозии бетона от процесса биообрастания поверхности бетонных/железобетонных опор. Также в статье произведен расчет экономической эффективности от проведения мероприятий по очистке бетона от биообрастания, по результатам которого годовой экономический эффект составил 9 % от стоимости сметных работ. В случае если планомерно-предупредительные мероприятия по очистке от биообрастания проводятся не менее чем 1 раз в 5 лет, срок проведения межремонтных работ по устранению дефектов бетонных и железобетонных строительных конструкций можно увеличить в 1,5 раза. Благодаря проведенному расчету даны рекомендации по повышению долговечности и сроку эффективной эксплуатации мостовых конструкций.

Ключевые слова: мост, опора, бетон, железобетон, коррозия, массоперенос, математическая модель, диффузия

Для цитирования: Логинова С.А., Гоглев И.Н. К вопросу о повышении биостойкости бетонных и железобетонных мостовых опор // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 115–127. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-115-127](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127)

Вклад авторов

Логинова С.А. – получение данных для анализа; математическое моделирование; формулировка выводов; интерпретация результатов; написание текста рукописи.

Гоглев И.Н. – обзор публикаций по теме статьи; анализ и систематизация экспериментальных данных; оформление рукописи; работа с графическим материалом; редактирование и переработка рукописи.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

IMPROVING THE BIOSTABILITY OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE BRIDGE SUPPORTS

S.A. LOGINOVA^{1✉}, Cand. Sci. (Engineering)
I.N. GOGLEV²

¹*Yaroslavl State Technical University, Moskovsky ave., 88, Yaroslavl, 150023, Russian Federation*

²*Ivanovo State Politechnical University, Sheremetevsky ave., 21, Ivanovo, 150300, Russian Federation*

Abstract

Introduction. The article considers the aspects of the effect caused by the concrete biological corrosion on the durability of concrete and reinforced concrete structures of transport infrastructure facilities. Examples of real objects with identified areas of the combined effect of bio- and other types of the concrete corrosion are considered.

Aim. The study aims at investigating the processes of biofouling on the surface of bridge supports and mechanisms of biomass formation on the concrete surface depending on the mode of the fluid movement in the river flow.

Methods and materials. The dependence of the Reynolds number on the temperature and the coefficient of the river water kinematic viscosity is considered. A physical and mathematical model of the biocorrosion mass transfer, occurring during the flowover of a two-row bridge support system by a liquid flow under small Reynolds numbers, was developed and calculated.

Results. Due to the developed physical and mathematical model, the service life of the reinforced concrete bridge supports can be calculated, the “residual” durability can be determined, as well as the possible time of cleaning the concrete surface from biodeposits can be obtained.

Conclusions. According to the results of the conducted research, the dependence of the concrete biocorrosion effect on the process of the surface biofouling of concrete/reinforced concrete supports is revealed. In addition, the article provides the calculation of economic efficiency of the measures for cleaning concrete from biofouling. According to the calculation, the annual economic effect amounted to 9% of the budgeted cost of the performed works. In the case of performing scheduled preventive measures for cleaning from biofouling at least once every 5 years, the period for carrying out inter-repair work for eliminating defects in concrete and reinforced concrete building structures can be increased by 1.5 times. On the basis of the performed calculation, the recommendations on the increase in the durability and the period of the effective operation of bridge structures are provided.

Keywords: bridge, support, concrete, reinforced concrete, corrosion, mass transfer, mathematical model, diffusion

For citation: Loginova S.A., Goglev I.N. Improving the biostability of concrete and reinforced concrete bridge supports. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 115–127 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-115-127](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-115-127)

Author contribution statements

Loginova S.A. – obtaining data for analysis; mathematical modeling; formulation of conclusions; interpretation of results; writing the text of the manuscript.

Goglev I.N. – literature review; analysis and systematization of experimental data; manuscript design; work with graphic material; editing and revision of the manuscript.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

В настоящее время предотвращение обрушений мостовых сооружений остается одним из ключевых направлений научных исследований в отрасли транспортного строительства. Мостовые опоры должны обладать достаточной прочностью и устойчивостью [1, 2]. Одной из причин обрушения мостовых сооружений является коррозионное разрушение строительных конструкций. Например, в 2009 г. произошло разрушение опоры низководного железобетонного автодорожного моста через ручей в селе Лоева Ивано-Франковской области. Мост представлял собой железобетонную балочную конструкцию длиной 6 м, шириной 12 м. Разрушение железобетонной опоры моста привело к последующему обрушению железобетонной плиты проезжей части. К счастью, человеческих жертв удалось избежать [1].

Деграция бетонных и железобетонных строительных конструкций является следствием коррозионных процессов, происходящих в цементном камне. Наиболее часто в зонах разрушения бетона действует одновременно несколько видов коррозии, например



Рис. 1. Коррозионные повреждения железобетонных конструкций моста в Ивановской области:
 а – биокоррозия и карбонизация бетона мостовых опор;
 б – оголение и коррозия продольной арматуры плиты покрытия.

Fig. 1. Corrosive damages of the reinforced concrete structures of the bridge in the Ivanovo Oblast:
 а – biocorrosion and carbonization of the bridge support concrete;
 б – exposure and corrosion of the longitudinal reinforcement of the roof slab

карбонизация + хлоридная + биологическая и другие сочетания. Итогом таких совместных процессов являются обширные зоны поражения конструкций (рис. 1а, б) транспортных сооружений.

И если исследования по влиянию карбонизации и хлоридной коррозии, а также по их выявлению на полевой и лабораторной стадии обследования строительных конструкций в литературе встречаются достаточно часто [6, 7], то вот вопросы выявления и исследования биологической коррозии отражены недостаточно широко. До настоящего времени предотвращение биообрастания подводных бетонных и железобетонных сооружений проводилось в основном за счет обработки поверхностей биоцидами для уничтожения или предотвращения оседания потенциальных загрязняющих веществ. Однако экологическая безопасность ряда биоцидов против биообрастания вызывает серьезные опасения, возникает необходимость поиска альтернативных методов защиты [7].

Предмет и методы исследования

Рассмотрим частный случай коррозионного разрушения железобетонных мостовых опор в водной среде, усугубленный биообрастанием. Благоприятные условия для биообрастания складываются на задней торцевой части опоры в области низких давлений [3]. Около поверхности обтекаемого тела создается область переменных скоростей и давлений. Чаще всего биообрастание начинается с образования биопленки, состоящей из скопления органических и неорганических соединений и различных микроорганизмов, прикрепленных к поверхности мостовых опор. Толщина образующейся биопленки зависит от гидравлической нагрузки, концентрации органических веществ, от пористости материала, влияния факторов внешней среды [3, 4]. Турбулентные потоки в пограничном слое приводят к нарушению целостности биопленки. Сброс биомассы и ее рост происходят непрерывно, поэтому на практике биопленка никогда не имеет строго определенной толщины по всей поверхности конструкции. Биопленка служит субстратом для поселения водорослей, моллюсков, некоторых форм грибов и т. д., характерных для речных вод [4, 5]. Состав сообществ биообрастания сильно

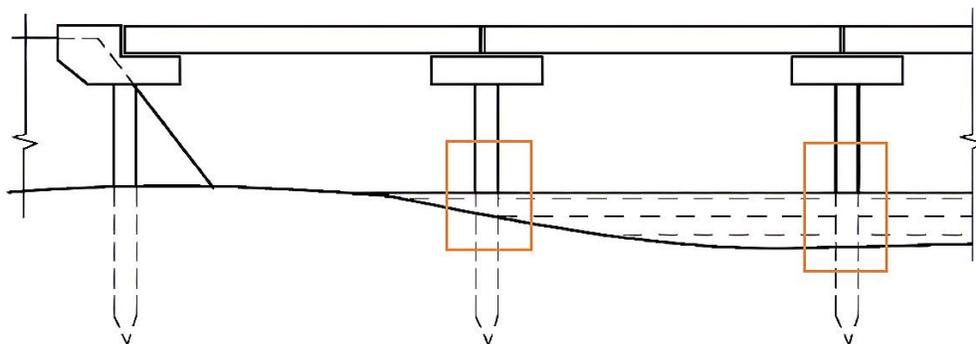


Рис. 2. Схема моста на свайном основании. Красным выделены наиболее уязвимые участки опор к биокоррозии и карбонизации

Fig. 2. Scheme of a bridge on a pile foundation. The most vulnerable to biocorrosion and carbonization support areas are highlighted in red

различается географически, сезонно и локально по глубине, также на него влияют многочисленные абиотические и биотические факторы. К абиотическим факторам относятся физико-химические характеристики воды, а именно: температура, рН, растворенный кислород и содержание органических веществ. Пресноводное обрастание обычно меньше морского и по числу видов, и по биомассе, а следовательно, и по толщине. Скорость обрастания в первую очередь зависит от скорости тока воды, которая определяет возможность оседания и удержания организмов на субстрате, снабжения их питательными веществами и кислородом и др.

Исследованию подвергался мост на свайном основании (рис. 2). Глубина реки в месте расположения моста менее 5 м. Скорость течения реки менее 2 км/ч. Свайная опора моста представлена плоской двурядной системой типовых железобетонных свай сплошного квадратного сечения $0,35 \times 0,35$ (м) с железобетонным ростверком по головам свай.

Оценка режима движения жидкости возможна с помощью числа Рейнольдса (Re):

$$Re = \frac{\rho \cdot d \cdot v}{\mu} = \frac{d \cdot v}{\vartheta}, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, кг/м^3 ;

d – величина, характеризующая линейные размеры тела, обтекаемого жидкостью, м;

v – средняя скорость движения жидкости, м/с;

μ – динамический коэффициент вязкости жидкости, $\text{мПа} \cdot \text{с}$;

ϑ – коэффициент кинематической вязкости воды, $\text{м}^2/\text{с}$.

Таблица 1

Зависимость числа Рейнольдса от температуры и коэффициента кинематической вязкости воды

Table 1

Dependence of the Reynolds number on the temperature and the coefficient of the water kinematic viscosity

$t, ^\circ\text{C}$	0	5	10	15	20
$\nu, 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$	1,79	1,52	1,31	1,15	1,01
$Re, 10^5$	1,17	1,38	1,61	1,82	2,09

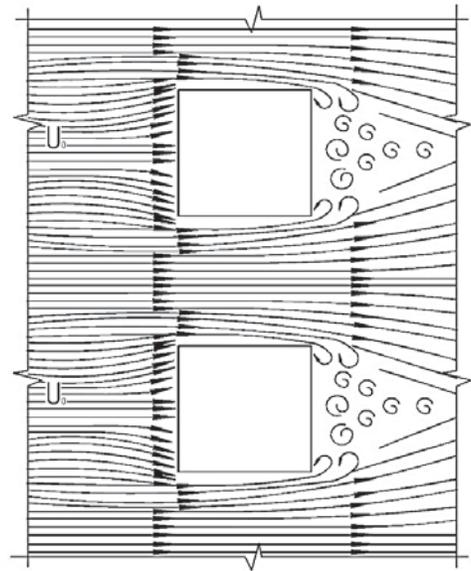


Рис. 3. Схема обтекания двурядной системы опоры моста потоком жидкости при малых числах Рейнольдса
Fig. 3. Scheme of the liquid flowing over a two-row bridge support at small Reynolds numbers



Рис. 4. Биокоррозия и карбонизация на железобетонных опорах автомобильно-дорожного моста в Ивановской области

Fig. 4. Biocorrosion and carbonation on reinforced concrete supports of the road bridge in the Ivanovo region

На рис. 3 представлена схема обтекания двурядной системы опоры моста квадратного сечения потоком жидкости при малых числах Рейнольдса. В расчете расстояние между опорами принималось равным 1 м. При малых числах Рейнольдса при данном расположении опор образуется два потока скоростей для каждой опоры, которые ведут себя независимо друг от друга. Увеличение числа Рейнольдса изменит характер обтекания опор: будут возникать вихри, которые станут оказывать влияние друг на друга.

Из литературных источников [6, 8] известно, что значения коэффициента кинематической вязкости (ν) существенно уменьшаются с повышением температуры t , °С. Рассмотрим диапазон наиболее характерных температур $T = 0 \dots 20$ °С. Расчетные значения числа Рейнольдса в зависимости от температуры (T) и коэффициента кинематической вязкости воды (ν) при средней скорости течения 2 км/ч представлены в табл. 1. Согласно табл. 1 в рассматриваемом случае движение жидкости – ламинарное.

При обтекании опоры потоком жидкости вблизи его поверхности образуется тонкий пограничный слой жидкости [9]. Биообрастание поверхности опоры приводит к возникновению шероховатости, которая

влияет на сопротивление трения и способствует возникновению турбулентного движения в пограничном слое. Математическая теория пограничного слоя была дана Л. Прандтлем. Число Прандтля (Pr) взаимосвязано с числами Рейнольдса (Re) и Пекле (Pe):

$$Pe = Re \cdot Pr \quad (2)$$

Скорость течения жидкости вблизи обтекаемой поверхности намного меньше скорости течения в основной части потока, а в месте контакта поверхности и жидкости равна нулю. В случае обтекания поверхности, подверженной биообрастанию, турбулентность в таких слоях возникает значительно раньше, чем при обтекании гладких поверхностей. Толщина пограничного слоя не может обладать четко выраженной границей в связи с природной неравномерностью биообрастания поверхности. При температуре жидкости $T = 0 \dots 20$ °С значения средней толщины турбулентного слоя составит 6,9...6,1 мм соответственно. До точки отрыва распределение скоростей в пограничном слое в непосредственной близости от поверхности аналогично распределению при взаимодействии турбулентного потока с плоской поверхностью. Далее оторвавшийся пограничный слой

образует вихревое течение. В результате контакта бетона с жидкостью концентрация растворенного $\text{Ca}(\text{OH})_2$ в порах бетона начинает уменьшаться, вызывая растворение свободных кристаллов $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Как следствие, происходит постепенное «выщелачивание» бетона в зонах контакта с водой и карбонизация бетона в участках над водой (рис. 4).

С точки зрения теории массопереноса диффузия «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ к границе раздела фаз может быть описана дифференциальными уравнениями (3)–(10):

$$\frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial \tau} = k_1 \cdot \frac{\partial^2 C_1(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, -\delta_1 \leq x \leq 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial \tau} = k_2 \cdot \frac{\partial^2 C_2(x, \tau)}{\partial x^2}, \quad \tau > 0, 0 \leq x \leq \delta_2. \quad (4)$$

Начальные условия характеризуются уравнениями:

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = C_1(x, 0) = C_{1,0}, \quad (5)$$

$$C_2(x, \tau)|_{\tau=0} = C_2(x, 0) = C_{2,0}. \quad (6)$$

Граничные условия:

$$\left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\delta_1} = 0, \quad (7)$$

$$C_1(x, \tau)|_{\tau=0} = m \cdot C_2(x, \tau)|_{\tau=0}, \quad (8)$$

$$-\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot \left. \frac{\partial C_1(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0} = -\rho_{\text{биом}} \cdot k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=0}, \quad (9)$$

$$-k_2 \cdot \left. \frac{\partial C_2(x, \tau)}{\partial x} \right|_{x=\frac{\delta_2}{\delta_1}} = q_H(\tau). \quad (10)$$

Методом интегральных преобразований было получено решение уравнений (3)–(10) [10]:

$$\begin{aligned} Z_1(\bar{x}, Fo_m) = & \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} \left\{ 1 - NK_\delta + NK i_H^* \left[Fo_m + \frac{(1 - \bar{x})^2}{2} + \Phi(K_k, N, K_\delta) \right] \right\} \\ & + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\mu_n^2 \Psi_1'(\mu_n)} (\mu_n \sin \mu_n [\cos(\mu_n \bar{x}) \cos(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta) \\ & - \sqrt{K_k} K_\delta \sin(\mu_n \bar{x}) \sin(\mu_n \sqrt{K_k} K_\delta)] - \frac{N}{\sqrt{K_k}} \cos(\mu_n (1 + \bar{x})) \exp(-\mu_n^2 Fo_m) \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned}
 Z_2(\bar{x}, Fo_m) = & \frac{1}{1 + NK_k K_\delta} (1 - NK_\delta + Ki_H^* [\bar{x} - Fo_m K_k K_\delta] + NK_i^* (\phi(K_k, N, K_\delta) - \\
 & - \frac{1 + K_k \bar{x}^2}{2}) - 2 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J}{\mu_m^2 \Psi_1(\mu_m)} (\mu_m \sin \mu_m \cos[\mu_m \sqrt{K_k} (K_\delta - \bar{x})] - \\
 & - \frac{\mu_m}{\sqrt{K_k}} \sin(\mu_m \sqrt{K_k} K_\delta) \left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m^2 \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] + \\
 & + Ki_H^* \left[N \cos \mu_m \cos(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) + \frac{1}{\sqrt{K_k}} \sin \mu_m \sin(\mu_m \sqrt{K_k} \bar{x}) \right] \exp(-\mu_m^2 K_k Fo_m). \quad (12)
 \end{aligned}$$

Здесь: $C_1(x, \tau)$ – концентрация «свободного» $Ca(OH)_2$ в перерасчете на CaO в бетоне для времени τ в точке с координатой x , (кг CaO /кг бетона);
 $C_2(x, \tau)$ – концентрация «свободного» гидроксида кальция в перерасчете на CaO в биопленке в момент времени τ в произвольной точке с координатой x , (кг CaO /кг биомассы);
 $k_{1,2}$ – коэффициенты массопроводности, m^2/c ;
 δ_1 – толщина бетонной конструкции, м;
 δ_2 – толщина биопленки, м;
 $C_{1,0}$ – начальная концентрация «свободного» CaO , кг CaO /кг бетона;
 $C_{2,0}$ – начальная концентрация «свободного» CaO , кг CaO /кг биомассы;
 m – константа равновесия Генри, кг биомассы/кг бет.;
 $\rho_{бет}, \rho_{биом}$ – плотности бетона и биомассы, $кг/м^3$;
 $Z_1(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине бетона;

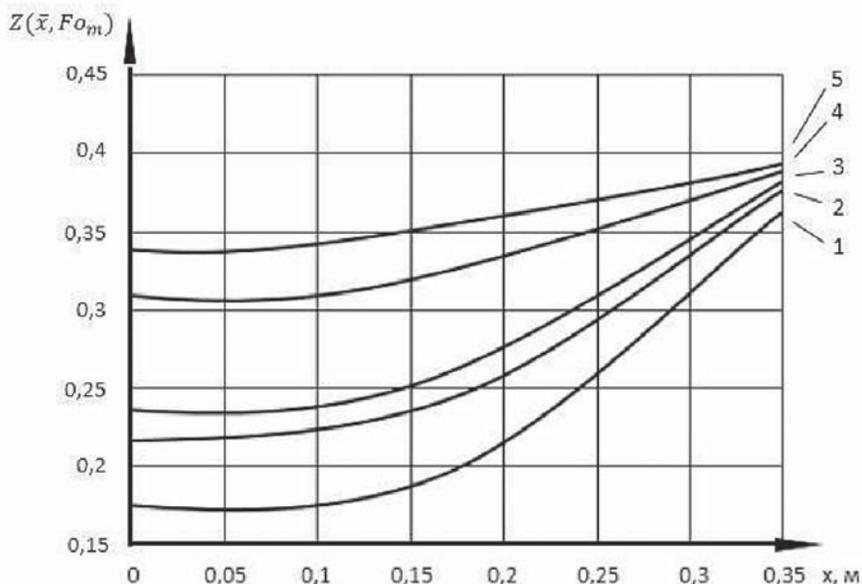


Рис. 5. Поля концентраций в бетонной мостовой опоре при критерии Фурье Fo_m равном: 1 – 0,16; 2 – 0,32; 3 – 0,4; 4 – 0,8; 5 – 1,2; что соответствует 2, 4, 5, 10 и 15 годам эксплуатации
Fig. 5. Concentration fields in the concrete bridge support at the Fourier criterion Fo_m equal to: 1 – 0,16; 2 – 0,32; 3 – 0,4; 4 – 0,8; 5 – 1,2; corresponding to 2, 4, 5, 10 and 15 years of operation, respectively

$Z_2(\bar{x}, Fo_m)$ – безразмерная концентрация переносимого компонента по толщине био-
 пленки;

$\bar{x} = x / \delta_1$ – безразмерная координата;

$K_k = k_2 / k_1$;

$K_\delta = \delta_2 / \delta_1$;

q_H – плотность потока массы, уходящей от биопленки в поток жидкости;

$N = (\rho_{\text{биом}} \cdot k_2) / (\rho_{\text{бет}} \cdot k_1 \cdot m)$ – коэффициент, учитывающий характеристики фаз;

$Fo_m = (k_1 \cdot \tau) / \delta_1^2$ – критерий Фурье;

$Ki_H^* = \frac{q_H \cdot \rho_{\text{бет}} \cdot m \cdot K_\delta}{\delta_2 \cdot \rho_{\text{биоп}} \cdot k_2 \cdot C_0}$ – массообменный критерий Кирпичева.

С целью установления срока службы бетонных опор моста в речной воде по предложенной математической модели были выполнены расчеты полей концентраций «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ по толщине бетонной опоры через 2, 4, 5, 10 и 15 лет эксплуатации. Скорость роста биомассы во времени пропорциональна концентрации клеток. Согласно литературным источникам [10–12] среднее увеличение толщины биообрастания за год эксплуатации мостовых опор в речной воде составляет 25–30 мм. Исходя из этого были определены плотности биомассы, соответствующие заданным временным отрезкам. Результаты расчетов приведены на рис. 5. В итоге был сделан вывод, что концентрация «свободного» $\text{Ca}(\text{OH})_2$ на поверхности бетонной опоры достигнет значения, соответствующего началу разложения высокоосновных составляющих бетона, через 2,1 года.

В настоящее время ГОСТ не регламентирует сроки проведения технической очистки подводных сооружений от биообрастания. Исследования и численные эксперименты по математической модели позволили сформулировать рекомендации по проведению плановых работ по очистке бетонных и железобетонных подводных конструкций от биообрастания.

Своевременное осуществление периодических осмотров частей мостов, находящихся ниже уровня воды, позволит снизить расходы на возможные ремонтные и восстановительные работы, а проведение плановой очистки подводных сооружений каждые 5 лет позволит снизить скорость их коррозионного разрушения.

Ниже приводится расчет экономической эффективности от проведения периодических работ по очистке подводных конструкций от биообрастания.

Согласно нормативным документам [13, 14] нормативный срок службы сооружения определяется по формуле:

$$T_c = \frac{100}{N_{\text{а.п.}}}, \quad (13)$$

где $N_{\text{а.п.}}$ – процент ежегодных амортизационных отчислений на полное восстановление сооружения.

Срок службы для бетонных и железобетонных мостов составляет 100 лет, а общая норма амортизационных отчислений $N_{\text{а.п.}} = 1,3\%$ в т. ч. на капитальный ремонт $0,3\%$ [13, 14].

Затраты и издержки, осуществляемые в процессе эксплуатации сооружений, рассчитываются по формуле [12, 13]:

$$Z_{\text{Э}} = \frac{K_{\text{Э}}}{\alpha_t} + \sum_1^{\gamma_{\text{кр}}-1} \frac{C_{\text{кр}}}{\alpha_t} + \sum_1^{T_c} \frac{C_{\text{тр}}}{\alpha_t} + \sum_1^{\gamma_{\text{зк}}-1} \frac{C_{\text{зк}}}{\alpha_t}, \gamma_{\text{кр}} - 1 = \frac{T_c}{T_{\text{кр}}} - 1, \gamma_{\text{зк}} - 1 = \frac{T_c}{T_{\text{зк}}} - 1, \quad (14)$$

где $K_{\text{Э}}$ – удельные капитальные вложения в ремонтную базу или стоимость основных производственных фондов, используемых при производстве ремонтно-строительных работ;

$C_{\text{кр}}$ – затраты на один капитальный ремонт;

$C_{\text{тр}}$ – затраты на один среднегодовой текущий ремонт;

$C_{\text{зк}}$ – затраты, связанные с восстановлением и поддержанием качества и долговечности конструкций, а также с проведением технического обслуживания сооружений, не учтенного в составе капитальных и текущих ремонтов;

t – годы проведения капитальных ремонтов или затрат по восстановлению и поддержанию качества и долговечности строительных конструкций в процессе эксплуатации сооружений;

$T_{\text{кр}}$ – периодичность капитальных ремонтов конструкций;

$T_{\text{зк}}$ – периодичность проведения затрат по восстановлению и поддержанию качества и долговечности строительных конструкций.

Значение коэффициента $1/\alpha_t$ при различных сроках осуществления затрат и нормативе приведения $E = 0,1$ является табличными величинами, где t – время в годах между моментом производства затрат и началом эксплуатации сооружений.

В то же время стоимость ежегодных текущих ремонтов определяется по формуле:

$$C_{\text{тр}} = \frac{(C_{\text{д}} - C_{\text{зк}})}{T_{\text{кр}}}, \quad (15)$$

где q – коэффициент, зависящий от модуля поверхности конструкции $M_{\text{н}}$, равного отношению площади внешней поверхности конструкций (м^2) к ее объему (м^3). Для массивных конструкций модуль поверхности $M_{\text{н}} \approx 5$, а коэффициент $q = 0,04$.

Годовой экономический эффект от использования мероприятия рассчитывается по формуле [13, 15]:

$$\text{Э}_r = (Z_1 - Z_2) \cdot A_2, \quad (16)$$

где Z_1 – приведенные затраты, определяемые как $Z = (Z_{\text{н}} - Z_3)$ для строительной конструкции с исходным уровнем качества и долговечности (аналог);

$Z_{\text{н}}$ – приведенные затраты, осуществляемые до начала эксплуатации сооружений;

Z_3 – приведенные затраты, осуществляемые в процессе эксплуатации зданий или сооружений за срок службы T_c ;

Z_2 – то же, для конструкции повышенного качества и долговечности;

A_2 – годовой объем внедрения предлагаемого мероприятия по повышению качества и долговечности.

Согласно нормативным документам [13–16] восстановление первоначальных транспортно-эксплуатационных качеств сооружения необходимо проводить каждые 15–30 лет.

При периодичности капитальных ремонтов в 20 лет коэффициент $\mu_{\text{кр}} = 0,174$; в 30 лет, $\mu_{\text{тр}} = 0,1$. Тогда при $t = 20$ лет $1/\alpha_t = 0,513$; при $t = 30$ лет $1/\alpha_t = 0,035$; при $t = 40$ лет $1/\alpha_t = 0,022$; при $t = 60$ лет $1/\alpha_t = 0,003$; при $t = 80$ лет $1/\alpha_t = 0,001$; при $t = 90$ лет $1/\alpha_t = 0,001$; при $t = 100$ лет $1/\alpha_t = 0,001$.

Приведенные затраты на 100 м² бетонной поверхности равны:

$$Z_1 = Z_{н1} + Z_{з1} = 58164,19 + 41067,12 = 99231,31 \text{ руб.}$$

$$Z_2 = Z_{н2} + Z_{з2} = 58164,19 + 30121,05 = 88285,24 \text{ руб.}$$

Годовой экономический эффект составит $\Delta_r = (Z_1 - Z_2) \cdot A_2 = 99231,31 - 88285,24 \cdot 0,08 \approx 9\%$

Ожидаемый экономический эффект в текущих ценах для Ивановской области от проведения своевременных плановых-предупредительных работ против биообрастания составил 9% от стоимости сметных работ [10, 17].

В результате исследования было установлено, что проведение очистительных от биообрастания работ с периодичностью каждые 5 лет в совокупности с иными мероприятиями плановых-предупредительных работ позволит увеличить срок межремонтных работ в 1,5 раза.

Список литературы

1. Аварии и разрушения мостовых сооружений, анализ их причин. Часть 2 / И.Г. Овчинников, И.И. Овчинников, И.Ю. Майстренко, А.В. Кокодеев // Интернет-журнал «Транспортные сооружения». – 2017. – Том 4, № 4. – URL: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. <https://doi.org/10.15862/14TS417>
2. Анализ и систематизация причин разрушения мостовых сооружений / А.А. Карамышева, Д.А. Строев, М.А. Колотиенко, А.И. Коник // Инженерный вестник Дона. – 2019. – № 3 (54). – С. 34.
3. Шумейко В.И. Архитектурное конструирование зданий и сооружений / В.И. Шумейко, Е.В. Пименова, А.И. Евтушенко. – Ростов-на-Дону: ДГТУ, 2017. – С. 211–212.
4. Румянцева В.Е. Применение полевых и лабораторных методов определения карбонизации, хлоридной и сульфатной коррозии при обследовании строительных конструкций зданий и сооружений / В.Е. Румянцева, И.Н. Гоглев, С.А. Логинова // Строительство и техногенная безопасность. – 2019. – № 15 (67). – С. 51–58.
5. Еремин К.И. Методика экспериментальных исследований блоков покрытий промышленных зданий при аварийных воздействиях / К.И. Еремин, С.А. Матвеюшкин, Г.А. Арутюнян // Вестник МГСУ. – 2015. – № 12. – С. 34–46.
6. Логинова С.А. Моделирование кинетики и динамики протекания массопереноса при различных видах коррозии цементных бетонов / С.А. Логинова, И.Н. Гоглев // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2020. – № 6 (99). – С. 22–35. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2020-6-99-2>
7. Способ определения долговечности железобетонных конструкций: пат. RU 2755246 С1 / Д.С. Рыбнов, И.Н. Гоглев, К.Ю. Соколов. – Оpubл. 14.09.2021.
8. Nwafor A.U. Building failures/collapses and their reputational effect on building industry in Nigeria / A.U. Nwafor // International Journal of Science and Research. – 2015. – Vol. 4, no. 6. – P. 847–853.
9. Liang M.T. Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure / M.T. Liang, J.J. Lan // Cement and Concrete Research. – 2005. – Vol. 35, no. 3. – P. 540–550. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.010>.
10. Fedosov S.V. Mathematical model of concrete biological corrosion / S.V. Fedosov, S.A. Loginova // Magazine of Civil Engineering. – 2020. – Vol. 99, no. 7. – P. 9906. <https://doi.org/10.18720/MCE.99.6>
11. Безбабичева О. О продлении срока службы балочно-консольных монолитных мостов / О. Безбабичева, С. Краснов, А. Лозицкий // Вестник ХНАДУ. – 2012. – № 58. – С. 40–45.
12. Пастухов Ю.В., Сидельникова О.П. Контроль коррозии при эксплуатации зданий и сооружений в особых условиях / Ю.В. Пастухов, О.П. Сидельникова // Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и archit. – 2007. – Вып. 7 (26). – С. 42–43.
13. Руководство по определению экономической эффективности повышения качества и долговечности строительных конструкций / НИИЖБ Госстроя СССР. – Москва: Стройиздат, 1981. – 56 с.
14. Инструкция по определению экономической эффективности использования в строительстве новой техники, изобретений и рационализаторских предложений (СН 509-78) / НИИЖБ Госстроя СССР. – Москва: Стройиздат, 1979. – 65 с.

15. Макаров Д.А. Экономическая эффективность и финансовые риски проектного финансирования в жилищном строительстве / Д.А. Макаров, М.Н. Юденко // Микроэкономика. – 2020. – № 2. – С. 23–28. <https://doi.org/10.33917/mic-2.91.2020.23-28>
16. Новиков А.А. Долговечность бетонных и железобетонных конструкций в современном строительстве / А.А. Новиков, Е.М. Козлова // Инновационная наука. – 2018. – № 10. – С. 16–17.
17. Овчинников И.И. Долговечность железобетонных конструкций транспортных сооружений / И.И. Овчинников // Строительные материалы. – 2011. – № 2. – С. 60–62.

References

1. Ovchinnikov I.G., Ovchinnikov I.I., Maystrenko I.Y., Kokodeev A.V. Failures and collapses of bridge constructions, analysis of their causes. Part 2. Russian journal of transport engineering [Internet]. 2017;4(4). Available from: <https://t-s.today/PDF/14TS417.pdf>. <https://doi.org/10.15862/14TS417> (in Russian).
2. Karamysheva A.A., Stroyev D.A., Kolotienko M.A., Konik A.I. Analysis and systematization of the causes of the destruction of bridge structures. Inzhenernyi vestnik Dona = Engineering Journal of Don. 2019;(3):34 (in Russian).
3. Shumeiko V.I., Pimenova E.V., Evtushenko A.I. Architectural design of buildings and structures. Rostov-on-Don: Don State Technical University; 2017, p. 211–212 (in Russian).
4. Rumyantseva V.E., Goglev I.N., Loginova S.A. Application of field and laboratory methods for determining carbonization, chloride and sulfate corrosion in the examination of building structures of buildings and structures. Stroitel'stvo i tekhnogennaya bezopasnost' = Construction and industrial safety. 2019;(15):51–58 (in Russian).
5. Eremin K.I., Matveyushkin S.A., Arutyunyan G.A. Technique of experimental research of blocks of coatings of industrial buildings under emergency impacts. Vestnik MGSU. 2015;(12):34–46 (in Russian).
6. Loginova S.A., Goglev I.N. Modeling the kinetics and dynamics of mass transfer in various types of corrosion of cement concretes. Vestnik Cherepovetskogo gosudarstvennogo universiteta = Cherepovets State University Bulletin. 2020;(6):22–35. <https://doi.org/10.23859/1994-0637-2020-6-99-2> (in Russian).
7. Rybnov D.S., Goglev I.N., Sokolov K.Y. Method for determining the durability of reinforced concrete structures. Patent RU no. 2755246 C1. (in Russian).
8. Nwafor A.U. Building failures/collapses and their reputational effect on building industry in Nigeria. International Journal of Science and Research. 2015;4(6):847–853.
9. Liang M.T., Lan J.J. Reliability analysis for the existing reinforced concrete pile corrosion of bridge substructure. Cement and Concrete Research. 2005;35(3):540–550. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2004.05.010>.
10. Fedosov S.V., Loginova S.A. Mathematical model of concrete biological corrosion. Magazine of Civil Engineering. 2020;99(7):9906. <https://doi.org/10.18720/MCE.99.6>
11. Bezbabicheva O., Krasnov S., Lozitskiy A. On the extension of the service life of beam-cantilever monolithic bridges. Vestnik KhNADU = Bulletin of Kharkiv National Automobile and Highway University. 2012;(58):40–45 (in Russian).
12. Pastukhov Yu.V., Sidelnikova O.P. Corrosion control during the operation of buildings and structures in special conditions. Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura = Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture. 2007;(7):42–43 (in Russian).
13. NII ZHB Gosstroy of the USSR. Guidelines for determining the economic efficiency of improving the quality and durability of building structures. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1981. 56 p. (in Russian).
14. NII ZHB Gosstroy of the USSR. Instructions for determining the economic efficiency of using new technology, inventions and rationalization proposals in construction (SN 509-78). Moscow: Stroyizdat Publ.; 1979. 65 p. (in Russian).
15. Makarov D.A., Yudenko M.N. Economic efficiency and financial risks of project financing in housing construction. Mikroekonomika = Microeconomics. 2020;(2):23–28. <https://doi.org/10.33917/mic-2.91.2020.23-28> (in Russian).
16. Novikov A.A., Kozlova E.M. Durability of concrete and reinforced concrete structures in modern construction. Innovatsionnaya nauka = Innovation science. 2018;(10):16–17 (in Russian).
17. Ovchinnikov I.I. Durability of reinforced concrete structures of transport structures. Stroitelnye materialy = Construction Materials. 2011;(2):60–62 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Светлана Андреевна Логинова[✉], канд. техн. наук, доцент кафедры «Строительные конструкции» Ярославского государственного технического университета, Ярославль

e-mail: sl79066171227@yandex.ru

тел.: +7 (906) 617-12-27

Svetlana A. Loginova[✉], Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Building Structures, Yaroslavl State Technical University, Yaroslavl

e-mail: sl79066171227@yandex.ru

tel.: +7 (906) 617-12-27

Илья Николаевич Гоглев, соискатель, Ивановский государственный политехнический университет, Иваново

e-mail: azidplumbum00@mail.ru

тел.: +7 (926) 012-97-99

Ilya N. Goglev, applicant, Ivanovo State Polytechnical University, Ivanovo

e-mail: azidplumbum00@mail.ru

tel.: +7 (926) 012-97-99

[✉] Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.01

doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

К ВОПРОСУ СОЗДАНИЯ ВЕРИФИКАЦИОННОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ РАСЧЕТА КЕССОННОГО ЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ В ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОМ КОМПЛЕКСЕ SCAD

М.В. МОЗГОЛОВ, канд. техн. наук

Е.В. КОЗЛОВА 

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

Аннотация

Введение. Вопросами аналитических и компьютерных расчетов железобетонных кессонных перекрытий занимались многие исследователи. Анализ полученных ими данных показывает, что усилия в балках в зависимости от созданной конечно-элементной модели могут существенно отличаться. Некоторые модели не позволяют корректно подобрать армирование балок в автоматическом режиме вычислительного комплекса.

Целью данной работы является создание компьютерной модели кессонного перекрытия усилия, армирование и прогибы в балках которого можно сравнить с данными аналитического расчета, выполненного в соответствии с нормативными требованиями.

Материалы и методы. В соответствии с методом конечных элементов наиболее точной является модель, состоящая из конечных элементов стержневого типа. Наиболее простой аналитический расчет можно осуществить для кессонной конструкции квадратной в плане, с квадратными кессонами, так как упрощается определение коэффициентов, от которых зависит распределение нагрузки на балки. В связи с этим в качестве методики авторами разработаны три стержневые конечно-элементные модели перекрытия квадратного в плане $9,0 \times 9,0$ м с квадратными кессонами $0,9 \times 0,9$ м. Первая модель представляет собой стержневые конечные элементы таврового сечения с непосредственным приложением к ним погонной нагрузки, собираемой с отсеков по закону треугольника. Вторая и третья модели отличаются от первой способом приложения нагрузки на гибкий конечный элемент оболочечного типа регулярного и хаотичного разбиений.

Результаты. Результаты расчетов показали, что компьютерные модели достоверно отражают напряженное состояние балок кессонного перекрытия при сравнении с расчетом, выполненным аналитическим способом. Отклонения по изгибающим моментам не превышают +5 %.

Выводы. Разработанные конечно-элементные модели SCAD позволяют достоверно определить усилия и провести расчет железобетонных балок кессонного перекрытия по первой и второй группам предельных состояний, сравнить полученные данные с аналитическим расчетом, выполненным в соответствии с нормативными требованиями. Предлагаемые модели можно использовать при верификационных расчетах моделей перекрытия, состоящих из разных типов конечных элементов.

Ключевые слова: железобетонные кессонные перекрытия, конечно-элементная расчетная модель, верификационные вычисления, изгибающие моменты, поперечные силы

Для цитирования: Мозголов М.В., Козлова Е.В. К вопросу создания верификационной модели для расчета кессонного железобетонного перекрытия в вычислительном комплексе SCAD // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 128–140. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

Вклад авторов

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

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

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

CREATION OF A SCAD VERIFICATION MODEL FOR THE DESIGN CALCULATIONS OF A REINFORCED-CONCRETE WAFFLE SLAB FLOOR SYSTEM

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

E.V. KOZLOVA 

Kolomna Institute (branch), Moscow Polytechnic University, Oktyabrskoy Revoliutsii str., 408, Kolomna, 140402, Russian Federation

Abstract

Introduction. Numerous researchers have examined issues associated with the analytical and computer-assisted design calculations for reinforced-concrete waffle slab systems. The obtained data indicate that forces in the beams can vary significantly depending on the created finite element model. Some models provide no means to correctly select beam reinforcement in the automatic mode of the selected analysis system.

Aim. To create a computer model of a waffle slab floor system, forces, reinforcement, and deflections in whose beams would be comparable to the data of analytical design calculations performed in accordance with regulatory requirements.

Materials and methods. According to the finite element method, the most accurate model comprises bar finite elements. The simplest analytical calculation can be performed for a square structure comprising square waffle slabs since it becomes easier to ascertain coefficients determining how the load is distributed on the beams. In this connection, the authors developed three bar finite-element models of a rectangular floor system measuring 9.0 × 9.0 m (square waffle slabs of 0.9 × 0.9 m) to be used in the procedure. The first model comprises bar finite elements having a T-section directly subjected to a load per unit length distributed from the coffers according to the triangle law. The second and third models differ from the first model in the way the load is applied to a flexible shell finite element having regular and chaotic partitions.

Results. The obtained results indicate that computer models accurately reflect the stress state of beams in the waffle slab floor system as compared to the analytical calculations. Bending moment deviations do not exceed +5 %.

Conclusions. The developed SCAD finite-element models enable reliable determination of forces, design calculations for the reinforced-concrete beams of the waffle slab floor system according to the ultimate and serviceability limit states, as well as comparison of the obtained data with analytical calculations performed in accordance with regulatory requirements. The proposed models can be used in verification calculations for floor system models comprising different types of finite elements (bar, plate, shell, and their combinations).

Keywords: reinforced-concrete waffle slab floor systems, finite-element calculation model, verification calculations, bending moments, shear forces

For citation: Mozgolov M.V., Kozlova E.V. Creation of a SCAD verification model for the design calculations of a reinforced-concrete waffle slab floor system. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 128–140 [In Russ.]. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-128-140](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-128-140)

Author contribution statements

Mozgolov M.V. – creation of computer models, collection and processing of data, scientific editing of the article, text formatting.

Kozlova E.V. – collection and processing of data, analytical design calculations for structures, text formatting.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Одним из эффективных с конструктивной точки зрения и необычным по архитектуре является часторебристое перекрытие кессонного типа [1–7]. В последнее время с появлением новых технологий проектного, расчетного и производственного направлений интерес к кессонным перекрытиям возобновился. Распространение получают опалубочные системы SKYDOME, NAUTILUS, HOLEDECK, U-Boot Beton и др.

В связи с широким внедрением в области строительства BIM-технологий, утвержденных на законодательном уровне (СП 333.1325800.2020 Информационное моделирование в строительстве. Правила формирования информационной модели объектов на различных стадиях жизненного цикла), и массовым переходом инженеров на компьютерные методы расчета, о проектировании строительных конструкций заговорили в форме 3D-моделей, состоящих из различных конечных элементов (стержней, плит, оболочек, объемных тел, специальных конечных элементов). Монолитное балочное железобетонное перекрытие можно смоделировать на ЭВМ различными способами [8–17]. При получении армирования конструкции в автоматическом режиме вычислительного комплекса все модели имеют свои достоинства и недостатки, некоторые из них не позволяют корректно подобрать армирование балок по причине возникновения проблем, связанных со стыковкой конечных элементов разного типа.

При выполнении расчета инженер должен быть уверен, что его условная расчетная схема соответствует проектируемой конструкции, удовлетворяет требованиям надежности, экономичности и безопасности. Ошибочность принятого решения может привести в лучшем случае к необоснованному перерасходу материала, а в худшем – к снижению надежности конструкции или ее разрушению. В работе [17] представлены значения изгибающих моментов в балках кессонного перекрытия прямоугольного в плане $11,55 \times 9,0$ м с прямоугольными кессонами $1,65 \times 1,5$ м, рассчитанные при помощи различных компьютерных моделей вычислительного комплекса SCAD. Полученные данные сравниваются с данными аналитического расчета [4], при этом различия в изгибающих моментах составляют от $-6,3$ до $+61,9$ %. Значительные отклонения усилий в балках кессонных перекрытий, найденные аналитическими и компьютерными методами, отмечаются в работах [6, 7].

Цель

Целью данной работы является создание простой и понятной инженеру компьютерной конечно-элементной расчетной модели кессонного перекрытия, усилия в балках которого можно сравнить с усилиями аналитического расчета и в дальнейшем выполнить расчет конструкции по первой и второй группам предельных состояний в соответствии с требованиями норм. Впоследствии использовать данную модель в качестве верификационной.

Материалы и методы

С методикой аналитического расчета кессонных перекрытий, опертых по контуру, можно познакомиться в работах [1–7].

Например, в расчетной схеме, моделирующей балочное перекрытие, состоящей из пластинчатых (полка) и стержневых (ребро) конечных элементов, соединенных жесткими вставками, в стержнях кроме изгибающих моментов и поперечных сил возникают значительные продольные усилия и элемент при подборе арматуры будет сконструирован как внецентренно-растянутый, а подобранная арматура в нем будет распределена по всему периметру сечения [10, 11]. Распределенной по сечению ребра получается арматура и в моделях, составленных из оболочечных конечных элементов [15].

Наиболее простой аналитический расчет можно осуществить для кессонной конструкции квадратной в плане, с квадратными кессонами, так как упрощается определение коэффициентов, от которых зависит распределение нагрузки на балки. При одинаковой ортогональной жесткости перекрытия нагрузка на балки распределяется поровну.

Для анализа выбрано перекрытие квадратное в плане $9,0 \times 9,0$ м с квадратными кессонами $0,9 \times 0,9$ м, конструируемое из элементов системы SKYDOME (купол Н 400, перекладина Т 200, толщина полки 80 мм) [19], работающее на равномерно-распределенную нагрузку $q = 1,5$ Т/м² с шарнирным опиранием по контуру (рис. 1). Собственный расчетный вес перекрытия составляет: $g_p = (0,222 + 0,08) \cdot 2500 \cdot 1,1 = 831$ кг/м². В методе конечных элементов считается, что точные решения получаются для стержней постоянного сечения по их длине [14]. Поэтому в соответствии с геометрией перекрытия в качестве конечного элемента принят стержень – тавровая балка высотой 480 мм, с шириной ребра 200 мм, толщиной полки 80 мм, шириной полки 900 мм из бетона класса В25. В часторебристом перекрытии для балок одного направления балки другого направления являются для первых ребрами жесткости, и в соответствии с требованиями п. 8.1.11 СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения» в расчете мы должны учитывать всю ширину полки.

Были созданы три компьютерные модели, отличающиеся в способе приложения нагрузки. В первой модели погонная нагрузка прикладывалась непосредственно на балки по закону треугольника [3], собираемая с двух смежных отсеков: $q = 2 \cdot 1,5 \cdot 0,9/2 = 1,35$ Т/м.

Во второй модели равномерно-распределенная нагрузка прикладывалась на гибкую плиту из 41 прямоугольного конечного элемента оболочки, толщиной 1 см с модулем упругости материала $E = 1$ Т/м², коэффициентом Пуассона $\mu=0$ и коэффициентом линейного расширения материала $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-5}$ °С⁻¹, установленную в центре тяжести балок. Разбиение отсеков было регулярным, с шагом 5×5 элементов. Известно, что в методе конечных элементов

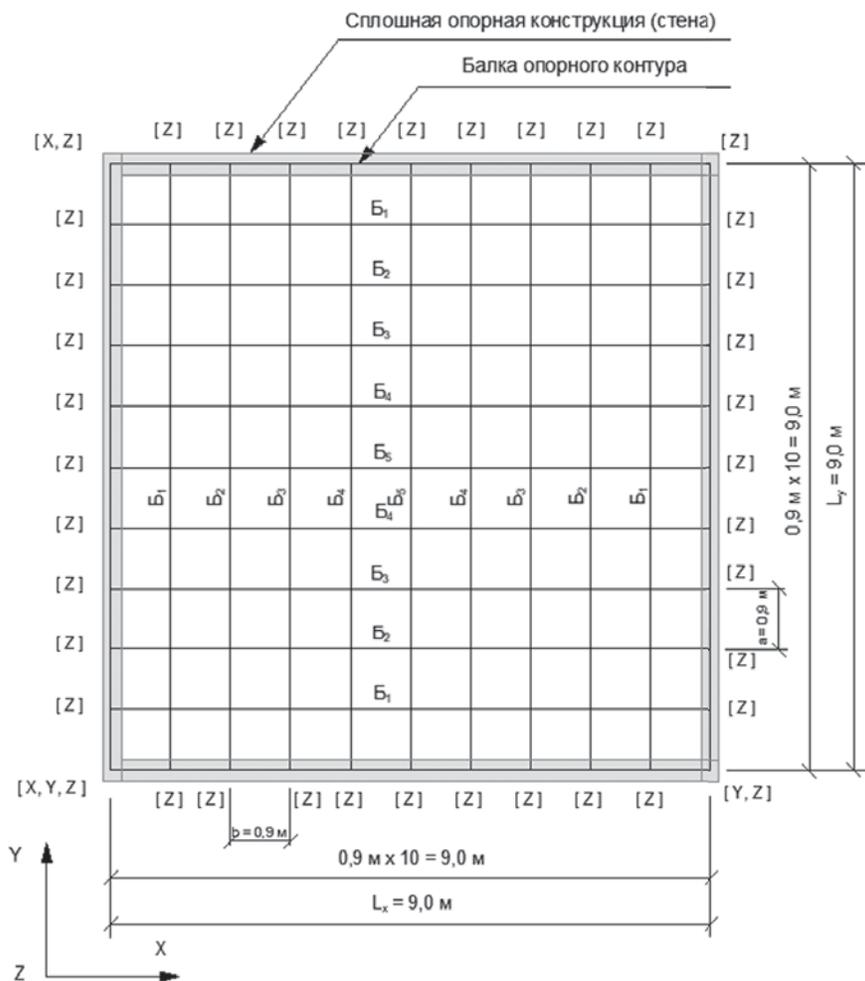


Рис. 1. Схема кессонного перекрытия. B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 – рассчитываемые балки.
 $[X, Y, Z]$ – связи, установленные в узлах балки опорного контура
Fig. 1. Schematic of the waffle slab floor system. B_1, B_2, B_3, B_4 and B_5 – analyzed beams.
 $[X, Y, Z]$ – connections established in the beam nodes of the support contour

сходимость данных по поперечной силе элементов пластинчатого типа может не обеспечиваться [13, 14]. Поэтому с целью изучения сходимости результата и возможности применения для сбора нагрузок гибкой плиты различной геометрии, например в треугольных и косых кессонах, в третьей модели плита выполнена из 42 треугольных конечных элементов оболочки размером 0,3 м с хаотичным петч-разбиением [14]. Расчет выполнялся всеми методами, предусмотренными ВК SCAD. При выполнении расчетов в протоколе предупреждение о геометрически-изменяемой системе отсутствовало.

В соответствии с требованиями п. 6.2.5 СП. 430.1325800.2018 «Монолитные конструктивные системы. Правила проектирования» и п. 2.1.1.1. Методического пособия [18] для учета ползучести бетона и наличия трещин при расчете балок компьютерных моделей начальный модуль упругости бетона умножался на коэффициент 0,2 для участков с трещинами (пролетные балки) и 0,3 – для участков без трещин (балки опорного контура).

Выполним аналитический расчет. Так как конструкция симметричная в плане относительно осей X и Y, рассматриваем 5 балок: B_1, B_2, B_3, B_4, B_5 . Расчет начинаем с определения q_1 и q_2 – долей равномерно-распределенной нагрузки q , действующей на перекрытие и приходящиеся на балки пролетов L_y и L_x . Вычисляем коэффициенты K_1 и K_2 :

$$K_1 = S_1 \cdot \alpha_1 \cdot L_y^4 \cdot \frac{1}{B_1} = \frac{5}{48} \cdot 0,125 \cdot 9,0^4 \cdot \frac{1}{18800} = 0,0045 \text{ м}^2/\text{Т}, \quad (1)$$

$$K_2 = S_2 \cdot \alpha_2 \cdot L_x^4 \cdot \frac{1}{B_2} = \frac{5}{48} \cdot 0,125 \cdot 9,0^4 \cdot \frac{1}{18800} = 0,0045 \text{ м}^2/\text{Т}, \quad (2)$$

где B_1, B_2 – жесткость перекрытия вдоль осей Y и X.

В нашем случае:

$$B_1 = B_2 = 0,2 \cdot E_b \cdot I = 18800 \text{ Тм}^2, \quad (3)$$

$$q_1 = \frac{K_2}{K_1 + K_2} \cdot q = \frac{0,0045}{0,0045 + 0,0045} \cdot 1,5 = 0,75 \text{ Т/м}^2, \quad (4)$$

$$q_2 = \frac{K_1}{K_1 + K_2} \cdot q = \frac{0,0045}{0,0045 + 0,0045} \cdot 1,5 = 0,75 \text{ Т/м}^2. \quad (5)$$

Расчет начинаем с центральной балки B_5 , так как ее усилия являются базовыми для остальных балок. Определяем максимальный изгибающий момент в середине пролета и поперечную силу в приопорной зоне.

Балка B_5

$$M_{B5}^{\max} = \alpha_1 \cdot q_1 \cdot b \cdot L_y^2 = 0,125 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 9,0^2 = 6,83 \text{ Тм}, \quad (6)$$

$$Q_{B5}^{\max} = 0,5 \cdot q_1 \cdot b \cdot L_y = 0,5 \cdot 0,75 \cdot 0,9 \cdot 9,0 = 3,04 \text{ Т}. \quad (7)$$

Балка B_4

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{3,6}{9,0} = 0,4, \quad (8)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,4 - 2 \cdot 0,4^3 + 0,4^4) = 0,952, \quad (9)$$

$$M_{B4}^{\max} = n_y \cdot M_{B5}^{\max} = 0,952 \cdot 6,83 = 6,5 \text{ Тм}, \quad (10)$$

$$Q_{B4}^{\max} = n_y \cdot Q_{B5}^{\max} = 0,952 \cdot 3,04 = 2,89 \text{ Т}. \quad (11)$$

Балка B_3

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{2,7}{9,0} = 0,3, \quad (12)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,3 - 2 \cdot 0,3^3 + 0,3^4) = 0,813, \quad (13)$$

$$M_{B3}^{\max} = n_y \cdot M_{B5}^{\max} = 0,813 \cdot 6,83 = 5,55 \text{ Тм}, \quad (14)$$

$$Q_{B3}^{\max} = n_y \cdot Q_{B5}^{\max} = 0,813 \cdot 3,04 = 2,47 \text{ Т}. \quad (15)$$

Балка B_2

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{1,8}{9,0} = 0,2, \quad (16)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,2 - 2 \cdot 0,2^3 + 0,2^4) = 0,594, \quad (17)$$

$$M_{B2}^{\max} = n_y \cdot M_{B5}^{\max} = 0,594 \cdot 6,83 = 4,06 \text{ Тм}, \quad (18)$$

$$Q_{B2}^{\max} = n_y \cdot Q_{B5}^{\max} = 0,594 \cdot 3,04 = 1,81 \text{ Т}. \quad (19)$$

Балка B_1

$$\eta_y = \frac{x}{L_x} = \frac{0,9}{9,0} = 0,1, \quad (20)$$

$$n_y = \frac{16}{5} \cdot (\eta_y - 2 \cdot \eta_y^3 + \eta_y^4) = \frac{16}{5} \cdot (0,1 - 2 \cdot 0,1^3 + 0,1^4) = 0,314, \quad (21)$$

$$M_{B1}^{\max} = n_y \cdot M_{B5}^{\max} = 0,314 \cdot 6,83 = 2,14 \text{ Тм}, \quad (22)$$

$$Q_{B1}^{\max} = n_y \cdot Q_{B5}^{\max} = 0,314 \cdot 3,04 = 0,96 \text{ Т}. \quad (23)$$

С целью сравнения методики компьютерного определения перемещения конструкции с аналитической методикой найдем ее по общим правилам строительной механики.

Максимальное перемещение центральной шарнирно-опертой балки B_5 модели № 1 SCAD определяется по формуле:

$$f_{B5}^{\max} = \frac{5}{48} \cdot L_y^2 \cdot \frac{M_{B5}^{\max}}{B_1} = \frac{5}{48} \cdot 9,0^2 \cdot \frac{6,83}{2012} = 0,029 \text{ м}, \quad (24)$$

где B_1 – жесткость балки вдоль оси Y .

$$B_1 = 0,2 \cdot E_b \cdot I = 2012 \text{ Тм}^2. \quad (25)$$

Перемещение узла модели № 1 SCAD $f = 30,5 \text{ мм}$.

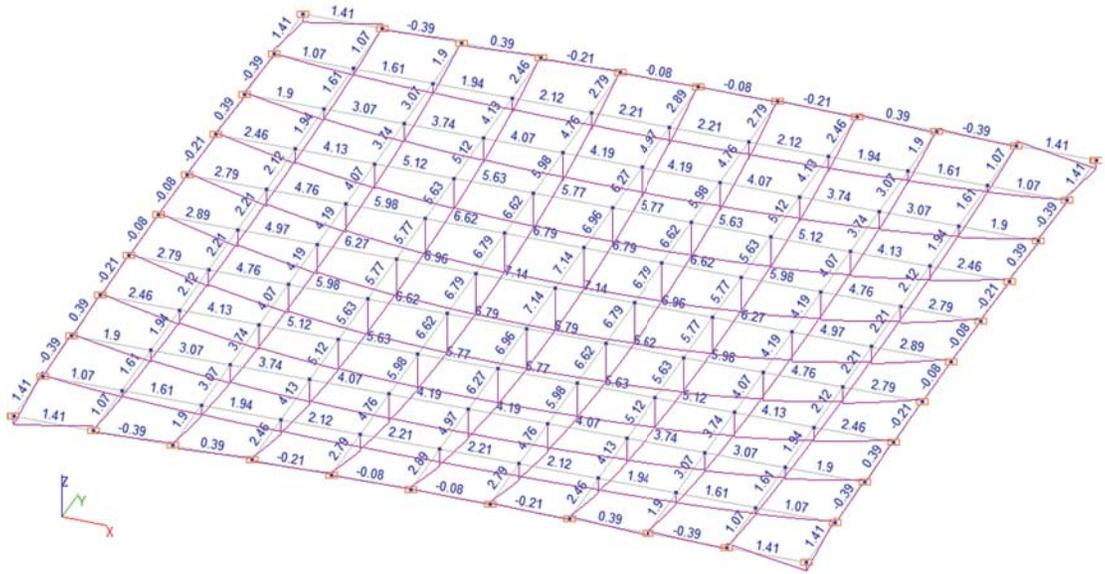


Рис. 2. Эпюры изгибающих моментов M_y, T_m в балках модели № 1 SCAD

Fig. 2. Diagrams of bending moments M_y and T_m in the beams of SCAD model No. 1

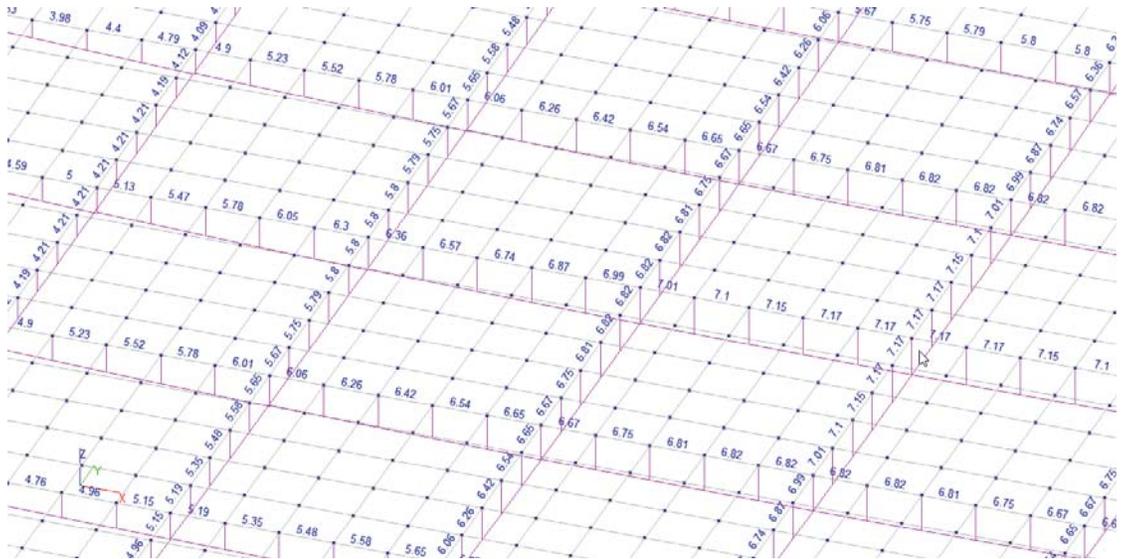


Рис. 3. Эпюры изгибающих моментов M_y, T_m в балках модели № 2 SCAD. Фрагмент центральной части перекрытия

Fig. 3. Diagrams of bending moments M_y and T_m in the beams of SCAD model No. 2. Central part of the floor system

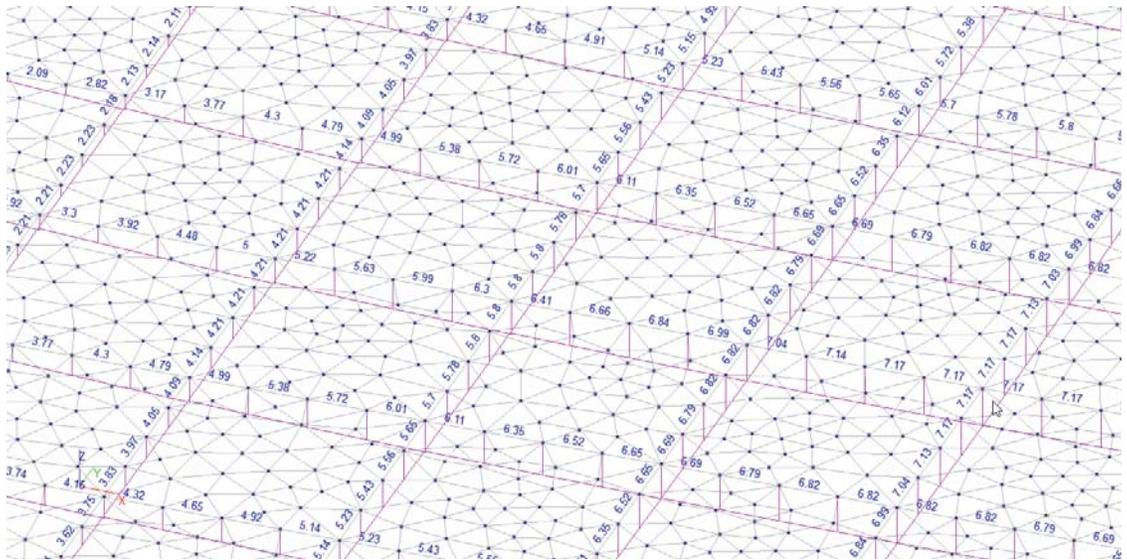


Рис. 4. Эпюры изгибающих моментов M_y , Тм в балках модели № 3 SCAD. Фрагмент центральной части перекрытия
Fig. 4. Diagrams of bending moments M_y and Tm in the beams of SCAD model No. 3. Central part of the floor system



Рис. 5. Значения перемещений f , мм, узлов модели № 2 SCAD. Фрагмент центральной части перекрытия
Fig. 5. Displacements f , mm of nodes in SCAD model No. 2. Central part of the floor system

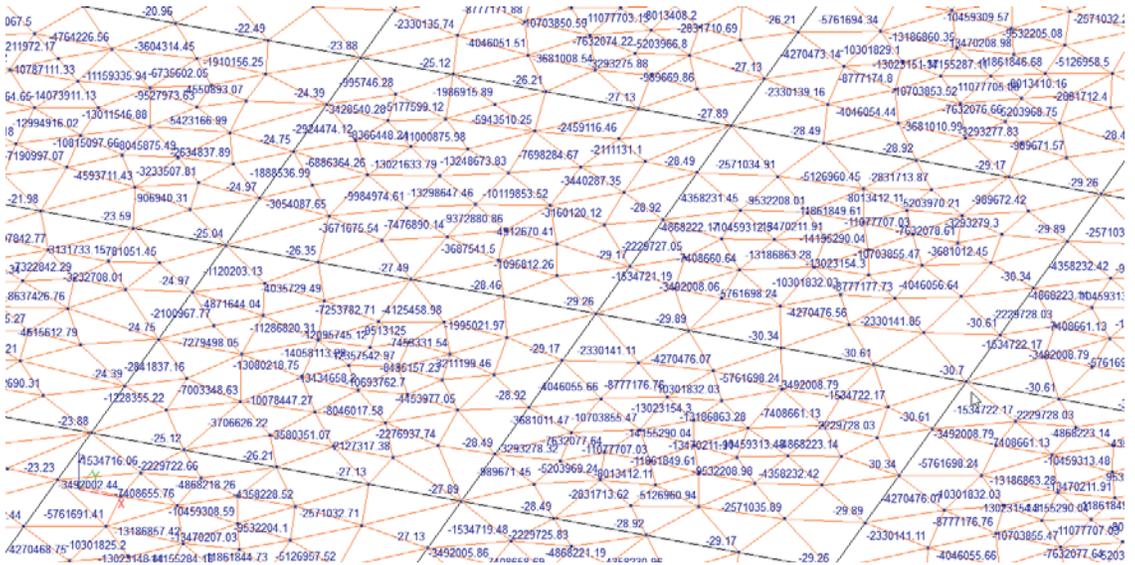


Рис. 6. Значения перемещений f , мм, узлов модели № 3 SCAD.

Фрагмент центральной части перекрытия

Fig. 6. Displacements f , mm of nodes in SCAD model No. 3.

Central part of the floor system

Таблица 1

Сравнение значений изгибающих моментов, поперечных сил и перемещений в балках кессонного перекрытия 9,0 × 9,0 м, полученные аналитическим методом и при помощи компьютерных моделей вычислительного комплекса SCAD

Table 1

Comparison of bending moments, shear forces, and displacements in the beams of the waffle slab floor system (9.0 × 9.0 m) obtained using the analytical method and SCAD models

Балка	Аналитический расчет (эталон)		Модель № 1 SCAD (нагрузка на стержни)			Модель № 2 SCAD (нагрузка на 41 КЭ)			Модель № 3 SCAD (нагрузка на 42 КЭ)		
	M_y Тм	Q_z Т	M_y Тм	Q_z Т	f мм	M_y Тм	Q_z Т	f мм	M_y Тм	Q_z Т	f мм
Б ₁	2,14 100 %	0,96 100 %	2,21 103 %	1,64 171 %	9,7	2,2 103 %	1,66 173 %	9,71	2,21 103 %	1,66 173 %	9,71
Б ₂	4,06 100 %	1,81 100 %	4,19 103 %	2,75 152 %	18,2	4,21 103 %	2,74 151 %	18,34	4,21 103 %	2,75 152 %	18,35
Б ₃	5,55 100 %	2,47 100 %	5,77 104 %	3,44 139 %	24,9	5,8 105 %	3,44 139 %	25,04	5,8 105 %	3,44 139 %	25,04
Б ₄	6,5 100 %	2,89 100 %	6,79 105 %	3,84 133 %	29,1	6,82 105 %	3,84 133 %	29,26	6,82 105 %	3,84 133 %	29,26
Б ₅	6,83 100 %	3,04 100 %	7,14 105 %	3,98 131 %	30,5	7,17 105 %	3,98 131 %	30,69	7,17 105 %	3,99 131 %	30,7

Результаты

Полученные данные при расчете конструкции в вычислительном комплексе SCAD представлены на рис. 2–6.

Данные аналитического расчета и компьютерных моделей представлены в табл. 1.

Проверим равновесие расчетных схем. Грузовая площадь балок

$$A = 9,0 \cdot 9,0 - (0,9 \cdot 0,45 \cdot 0,5 \cdot 40) = 72,9 \text{ м}^2.$$

$$\text{Суммарная нагрузка на балки } F = q \cdot A = 1,5 \cdot 72,9 = 109,35 \text{ Т.}$$

$$\text{Аналитический расчет: } Q = 0,96 \cdot 8 + 1,81 \cdot 8 + 2,47 \cdot 8 + 2,89 \cdot 8 + 3,04 \cdot 4 = 77,2 \text{ Т.}$$

Ошибка $109,35 - 77,2 = 32,15 \text{ Т}$, равновесие не соблюдается;

$$\text{Модель № 1 SCAD. } Q = 1,64 \cdot 8 + 2,75 \cdot 8 + 3,44 \cdot 8 + 3,84 \cdot 8 + 3,98 \cdot 4 = 109,28 \text{ Т.}$$

Совпадение 100 %, равновесие соблюдается.

Выводы

1. Предлагаемые расчетные модели вычислительного комплекса SCAD достоверно отражают напряженное состояние балок кессонного перекрытия квадратного в плане с квадратными кессонами при сравнении с расчетом, выполненным аналитическим способом. Отклонения по изгибающим моментам не превышают +5 %.

2. Аналитический метод определения усилий в балках кессонных перекрытий имеет погрешность, об этом свидетельствует распределение поперечных сил. Равновесие аналитической расчетной схемы не соблюдается, равновесие компьютерных моделей соблюдается.

3. При расчете кессонных перекрытий в виде стержневой конечно-элементной компьютерной модели удобно использовать модель с приложением нагрузки на гибкую плиту, расположенную в центре тяжести сечения стержневого конечного элемента. В качестве гибкой плиты эффективно применять 41, 42, 44 конечный элемент оболочки с условными физическими характеристиками (толщина 1 см, модуль упругости $E = 1 \text{ Т/м}^2$, коэффициент Пуассона $\mu = 0$, коэффициент линейного расширения материала $\alpha = 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$), обеспечивающими ему большую гибкость. Гибкая плита работает по биссектрисной схеме излома, передает нагрузку на несущие конструкции по закону треугольника, ее жесткость не влияет на их напряженно-деформированное состояние.

4. Созданные в вычислительном комплексе SCAD конечно-элементные модели позволяют провести расчет железобетонных балок кессонного перекрытия по первой и второй группам предельных состояний, полученные данные армирования, ширины раскрытия трещин и прогибов сравнить с «ручным» аналитическим расчетом, выполненным в соответствии с нормативными требованиями. Предлагаемые стержневые конечно-элементные модели как наиболее точные метода конечных элементов можно использовать при верификационных вычислениях моделей перекрытия, состоящих из разных типов конечных элементов (стержневых, плитных, оболочечных, их сочетаний). Недостатком предложенных конечно-элементных моделей является отсутствие расчетных данных для полки кессонной конструкции, а также невозможность приложения нагрузки от собственного веса в автоматическом режиме вычислительного комплекса.

5. Гибкий конечный элемент оболочечного типа с условными характеристиками удобно использовать при сборе нагрузок на стержневые расчетные схемы сложной конфигурации.

Список литературы

1. Расчет и конструирование частей жилых и общественных зданий: справочник проектировщика / П.Ф. Вахненко, В.Г. Хилобок, Н.Т. Андрейко, М.Л. Яровой. – Киев: Будівельник, 1987. – 424 с.
2. *Давыдов С.С.* Руководство по железобетонным и каменным конструкциям / С.С. Давыдов, А.С. Жиров, И.И. Иванова. – Москва: МИИТ, 1975. – 248 с.
3. *Иванов-Дятлов И.Г.* Железобетонные конструкции / И.Г. Иванов-Дятлов. – Москва, Ленинград: Министерство коммунального хозяйства РСФСР, 1950. – 296 с.
4. *Линович Л.Е.* Расчет и конструирование частей гражданских зданий / Л.Е. Линович. – Киев: Будівельник, 1972. – 664 с.
5. Железобетонные конструкции / И.И. Улицкий, С.А. Ривкин, М.В. Самолетов [и др.]. – Киев: Будівельник, 1972. – 992 с.
6. *Малахова А.Н.* Монолитные кессонные перекрытия зданий / А.Н. Малахова // Вестник МГСУ. – 2013. – № 1. – С. 79–86.
7. *Мозголов М.В.* Об эффективности косых кессонных железобетонных перекрытий / М.В. Мозголов, А.В. Туранова // Градостроительство и архитектура. – 2021. – Т. 11, № 3. – С. 20–25. <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2021.03.03>
8. *Алямовский А.А.* Инженерные расчеты в SolidWorksSimulation / А.А. Алямовский. – Москва: ДМК Пресс, 2019. – 464 с.
9. Проектирование несущих конструкций многоэтажного каркасного здания / С.В. Горбатов, О.В. Кабанцев, А.И. Плотников [и др.]. – Москва: АСВ, 2016. – 196 с.
10. Расчет и проектирование конструкций высотных зданий из монолитного железобетона / А.С. Городецкий, Л.Г. Батрак, Д.А. Городецкий [и др.]. – Киев: Факт, 2004. – 106 с.
11. *Городецкий А.С.* Компьютерные модели конструкций / А.С. Городецкий, И.Д. Евзеров. – Киев: Факт, 2005. – 344 с.
12. *Городецкий А.С.* Компьютерное моделирование в задачах строительной механики / А.С. Городецкий, М.С. Барабаш, В.Н. Сидоров. – Москва: АСВ, 2016. – 337 с.
13. SCADOffice. Версия 21. Вычислительный комплекс SCAD ++ / В.С. Карпиловский, Э.З. Криксунов, А.А. Маляренко [и др.]. – Москва: СКАД СОФТ, 2015. – 848 с.
14. *Перельмутер А.В.* Расчетные модели сооружений и возможность их анализа / А.В. Перельмутер, В.И. Сливкер. – Москва: ДМК Пресс, 2007. – 600 с.
15. *Скорук Л.* Поиск эффективных расчетных моделей ребристых железобетонных плит и перекрытий / Л. Скорук // CADmaster. – 2004. – № 3. – С. 78–83.
16. Вычислительный комплекс SCAD в учебном процессе. Статический расчет / А.А. Семенов, А.И. Габитов, А.А. Маляренко [и др.]. – Москва: АСВ, СКАД СОФТ, 2016. – 242 с.
17. *Лоскутов И.С.* Монолитные железобетонные кессонные перекрытия [Электронный ресурс] / И.С. Лоскутов // DWG.ru: Железобетонные конструкции. – URL: <https://dwg.ru/lib/2046> (дата обращения: 24.10.2021).
18. Плоские безбалочные железобетонные перекрытия: методическое пособие [Электронный ресурс]. – Москва, 2017. – URL: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf (дата обращения 24.10.21).
19. Многогранная опалубка из ABS – пластика для ребристых плит перекрытия. Skydome. Система для двусторонних перекрытий [Электронный ресурс]. URL: https://www.geoplastglobal.com/sites/default/files/katalog_skydome_ru.pdf (дата обращения 24.10.21).

References

1. *Vahnenko P.F., Hilobok V.G., Andrejko N.T., Jarovoi M.L.* Calculation and construction of parts of residential and public buildings. The designer's reference book. Kiev: Budivel'nik Publ.; 1987 (in Russian).
2. *Davydov S.S., Zhiron A.S., Ivanova I.I.* Guide to reinforced concrete and stone structures. Moscow: MIIT Publ.; 1975 (in Russian).
3. *Ivanov-Dyatlov I.G.* Reinforced concrete structures Moscow, Leningrad: Ministry of Public Utilities of the RSFSR; 1950 (in Russian).
4. *Linovich L.E.* Calculation and construction of parts of civil buildings. Kiev: Budivel'nik Publ.; 1972 (in Russian).

5. *Ulitskiy I.I., Rivkin S.A., Samoletov M.V., Dykhovichnyi A.A., Frenkel' M.M., Kretov V.I.* Reinforced concrete structures. Kiev: Budivel'nik Publ.; 1972 (in Russian).
6. *Malakhova A.N.* Monolithic caisson floors of buildings. Vestnik MGSU. 2013;(1):79–86 (in Russian).
7. *Mozgolov M.V., Turanova A.V.* On the effectiveness of oblique caisson reinforced concrete floors. Gradostroitel'stvo i arkhitektura = Urban construction and architecture. 2021;11(3):20–25 (in Russian). <https://doi.org/10.17673/Vestnik.2021.03.03>
8. *Alyamovskiy A.A.* Engineering calculations in SolidWorks Simulation. Moscow: DMK Press Publ.; 2019 (In Russian).
9. *Gorbatov S.V., Kabantsev O.V., Plotnikov A.I., Rodina A.Yu., Senin N.I., Filimonova E.A., Domarova E.V.* Design of load-bearing structures of a multi-storey frame building. Moscow: ASV Publ.; 2016 (in Russian).
10. *Gorodetskiy A.S., Batrak L.G., Gorodetskiy D.A., Laznyuk M.V., Yusipenko S.V.* Calculation and design of structures of high-rise buildings made of monolithic reinforced concrete. Kiev: Fact Publ.; 2004 (in Russian).
11. *Gorodetskiy A.S., Evzerov I.D.* Computer models of structures. Kiev: Fact Publ.; 2005. (in Russian).
12. *Gorodetskiy A.S., Barabash M.S., Sidorov V.N.* Computer modeling in problems of structural mechanics. Moscow: ASV Publ.; 2016 (in Russian).
13. *Karpilovskiy V.S., Kriksunov E.Z., Malyarenko A.A., Fialko S.Yu., Perel'muter A.V., Perel'muter M.A.* SCAD Office. Version 21. The SCAD ++computing complex. Moscow; SKAD SOFT Publ.; 2015 (in Russian).
14. *Perel'muter A.V., Slivker V.I.* Design models of structures and the possibility of their analysis. Moscow: DMK Press Publ.; 2007 (in Russian).
15. *Skoruk L.* Search for effective computational models of ribbed reinforced concrete slabs and floors. CADmaster. 2004;(3):78–83 (in Russian).
16. *Semenov A.A., Gabitov A.I., Malyarenko A.A., Poryvaev I.A., Safiullin M.N.* The SCAD computing complex in the educational process. Static calculation. Moscow: ASV Publ., SKAD SOFT Publ.; 2016. (in Russian).
17. *Loskutov I.S.* Monolithic reinforced concrete coffered floors. DWG.ru [Internet]. Available from: <https://dwg.ru/lib/2046> (in Russian).
18. Flat girderless reinforced concrete floors: a methodological guide [Internet]. Moscow; 2017. Available from: https://www.faufcc.ru/upload/methodical_materials/mp60_2017.pdf (in Russian).
19. Reusable formwork made of ABS plastic Skydome. System for coffered floors [Internet]. Available from: https://www.geoplastglobal.com/sites/default/files/katalog_skydome_ru.pdf (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

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

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

Елизавета Вадимовна Козлова✉, студент 3-го года обучения направления «Строительство» Коломенского института (филиала) ФГБОУ ВО «Московский политехнический университет», Коломна
e-mail: lizakozlova2014@gmail.com

Elizaveta V. Kozlova✉, 3rd year student on "Construction", Kolomna Institute (branch), Moscow Polytechnic University, Kolomna
e-mail: lizakozlova2014@gmail.com

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624-2/-9

doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-141-153](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-141-153)

РАЗРАБОТКА МЕТОДА КАПИТАЛЬНОГО РЕМОНТА МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

З.Р. МУХАМЕТЗЯНОВ✉, д-р техн. наук

Н.Э. УРМАНШИНА, канд. техн. наук

Р.А. ФАЮРШИН

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

Аннотация

Введение. В статье рассматриваются вопросы разработки перспективных методов капитального ремонта магистральных трубопроводов.

Целью исследования является разработка экономически оправданного и эффективного метода капитального ремонта магистральных трубопроводов без остановки его эксплуатации с применением композитных материалов.

Методы. Для достижения поставленной цели проведены натурные эксперименты. Для определения оптимального структурного состава ремонтного узла из композитных материалов показан алгоритм применения программного продукта SOLIDWORKS. Проведен сравнительный анализ результатов экспериментов и моделирования.

Результаты. Сравнительный анализ результатов экспериментов и моделирования технологии капитального ремонта магистральных трубопроводов с применением программного продукта SOLIDWORKS показал высокую степень сходимости полученных результатов. По результатам моделирования получена зависимость напряженно-деформированного состояния участка от количества слоев композитного материала. Полученная зависимость позволила смоделировать такие параметры технологии капитального ремонта магистрального трубопровода, как геометрические размеры дефектов, марку композитного материала, количественный состав композитного узла.

Выводы. Полученные с высокой степенью достоверности результаты исследований по разработке технологии капитального ремонта магистральных трубопроводов с использованием композитных материалов позволяют рекомендовать этот метод для промышленного применения. Предложенный метод моделирования технологии капитального ремонта магистральных трубопроводов с использованием программного продукта SOLIDWORKS позволяет существенно снизить трудоемкость и продолжительность процесса определения оптимального количественного состав композитного узла для ремонта трубопроводов по рабочим параметрам эксплуатации сооружений и по геометрическим размерам дефектов.

Ключевые слова: магистральный трубопровод, капитальный ремонт, моделирование, ремонтный узел, композитный материал, напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Мухаметзянов З.Р., Урманшина Н.Э., Фаюршин Р.А. Разработка метода капитального ремонта магистральных трубопроводов с применением композитных материалов // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 141–153. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-141-153](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-141-153)

Вклад авторов

Мухаметзянов З.Р. – определение и обоснование подхода к разработке метода капитального ремонта магистральных трубопроводов.

Урманшина Н.Э. – исследование и обработка полученных экспериментальных результатов.
Фаюршин Р.А. – моделирование параметров технологии капитального ремонта магистрального трубопровода с использованием программы SOLIDWORKS.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

A METHOD FOR OVERHAUL REPAIRS OF TRUNK PIPELINES USING COMPOSITE PIPING

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

N.E. URMANSHINA, Cand. Sci. (Engineering)

R.A. FAYURSHIN

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

Abstract

Introduction. The paper discusses the development of economically feasible and efficient overhaul methods for trunk pipelines using composite materials that can be carried out without shutdown.

Methods. Full-scale experiments were carried out to achieve this goal. To determine the optimal structural composition of the repair assembly from composite materials, the algorithm of the SOLIDWORKS software was applied. Experimental and modeling results were further compared.

Results. A comparative analysis of the results obtained in the experiments and modeling of overhaul repair process of trunk pipelines using SOLIDWORKS software showed their good agreement. Based on the modeling results, the dependence of the stress-strain state at the assembly on the number of composite material layers was established. The obtained dependence allowed such parameters of the trunk pipeline overhaul process, as geometric dimensions of defects, the type of composite material, and the quantitative composition of a composite assembly, to be modeled.

Conclusions. The obtained research results on the development of overhaul process of trunk pipelines using composite materials proved highly reliable, hence recommended for industrial application. The proposed method of modeling the overhaul process of trunk pipelines using SOLIDWORKS software significantly reduces the complexity and duration of determining the optimal quantitative composition of the composite assembly for repairing pipelines based on the operating parameters of structures and the geometric dimensions of defects.

Keywords: trunk pipeline, overhaul repairs, modelling, repair assembly, composite material, stress-strain state

For citation: Mukhametzyanov Z.R., Urmanshina N.E., Fayurshin R.A. A method for overhaul repairs of trunk pipelines using composite piping. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 141–153 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-141-153](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-141-153)

Author contribution statements

Mukhametzyanov Z.R. – determination and substantiation of overhaul repair method of trunk pipelines.

Urmanshina N.E. – data collection, data elaboration.

Fayurshin R.A. – modeling parameters of a trunk pipeline overhaul repairs using SOLIDWORKS software.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Введение

Магистральные трубопроводы являются наиболее экономичным видом транспортировки нефти, газа, нефтепродуктов, а трубопроводные системы – это важнейшая составная часть топливно-энергетического комплекса, бесперебойное функционирование которого имеет исключительное значение для экономики государства. Общая протяженность магистральных трубопроводов в России превышает 200 тыс. км. В настоящее время 37 % трубопроводов эксплуатируется более 20 лет, что требует повышенного внимания к их эксплуатационной надежности и технической безопасности.

Опыт эксплуатации магистральных трубопроводов показывает прямую зависимость их надежности от своевременного и эффективного проведения работ по капитальному ремонту на линейной части.

К общепринятым технологиям ремонта относятся [1–3]:

- вырезка узла трубы или поврежденного участка с заменой на новый участок;
- заварка дефекта после предварительной механической обработки;
- использование композитных ремонтных систем;
- муфтовые ремонтные системы.

Традиционным методом для капитального ремонта сильно поврежденных участков считается удаление всего узла трубы или вырезка поврежденной части, с последующей сваркой нового участка [4].

Но в этом методе ремонта имеется ряд недостатков. Он подходит только для прямых участков труб, а не для соединений или изгибов. Кроме того, сварка трубопроводов является дорогостоящей и трудоемкой операцией, особенно если это трубопроводы подземной прокладки. В большинстве случаев для выполнения этой работы требуется тяжелая строительная техника. К тому же сварка требует проведения подготовительных мероприятий по отключению трубопровода и подготовке к проведению взрывоопасных работ.

Существующие методы капитальных ремонтов трубопроводов

Как показывает зарубежная и отечественная практика, экономически оправданным и обоснованным является метод капитального ремонта трубопроводов без остановки перекачки, а именно: методы ремонта с помощью стальных сварных муфт, намоточных ремонтных конструкций из композиционных материалов и муфт, устанавливаемых по композитно-муфтовой технологии [5–8].

Из перечисленных методов наиболее перспективной считается технология послойного нанесения композитного материала с различными материалами волокон для придания композитной муфте необходимых свойств [9–11]. Данный метод позволяет производить капитальный ремонт большинства трубопроводов без ограничения длины дефектов. Но вместе с этим существует проблема определения наиболее оптимального и рационального количественного структурного состава композитного материала, приемлемого для использования в определенных производственных условиях [12]. Кроме того, в нормативно-технической документации имеются рекомендации по ремонту магистральных трубопроводов, имеющих дефекты незначительных размеров (до 100 мм), но они отсутствуют по ремонту дефектов, имеющих большие длины и эксплуатируемые при избыточном давлении 4 МПа [13–16].

Поэтому стоит задача определения оптимального количественного состава композитного узла для ремонта трубопроводов на основе моделирования процесса в зависимости от размеров дефектов, диаметра и материала трубопровода.

Метод капитального ремонта трубопровода с применением моделирования в программе SOLIDWORKS

Для исследований и решения заявленной проблемы проведено моделирование параметров технологии капитального ремонта магистрального трубопровода под избыточным давлением $P = 4$ МПа с использованием программы SOLIDWORKS, с геометрическими характеристиками и параметрами дефекта (рис. 1), указанными в табл. 1 [17].

Механические характеристики для композита и материала трубы, необходимые для моделирования с применением программного продукта SOLIDWORKS, приводятся в табл. 2.

В целом было смоделировано восемь вариантов ремонта трубы, различающихся количеством слоев композитного материала, нанесенного на место дефекта (табл. 3).

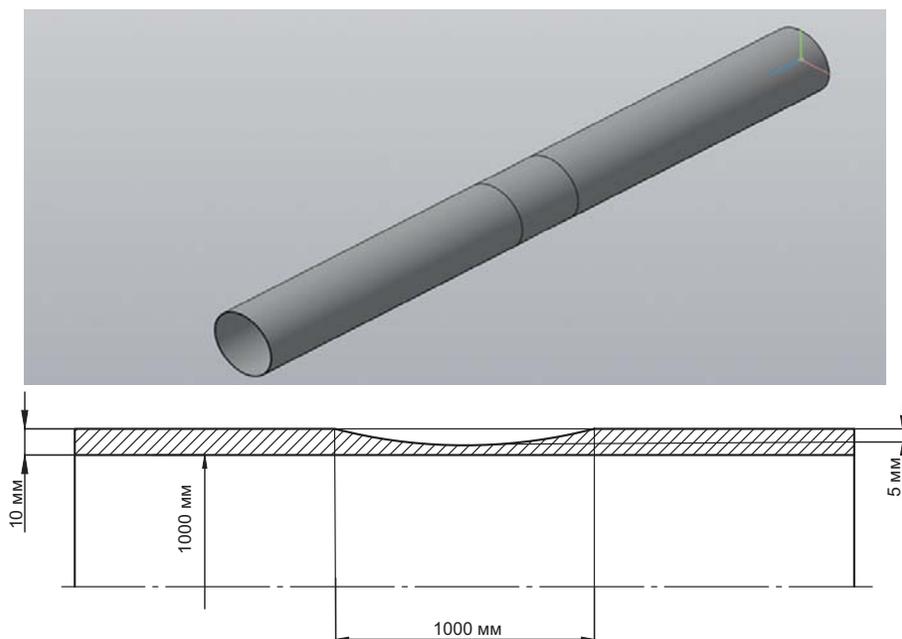


Рис. 1. Модель дефектного участка
 Fig. 1. Defect area model

Таблица 1

Исследуемые параметры трубы и дефекта

Table 1

Studied parameters of pipe and defect

Диаметр внутренний, $D_{вн}$, мм	Толщина, s , мм	Длина ремонтируемого участка, l , мм	Наименьшая толщина дефектного участка, s_d , мм
1000	10	1000	5

Таблица 2

Характеристики материалов трубопровода и композитного материала

Table 2

Characteristics of piping and composite material

Наименование параметров	Труба	Композит
Марка/состав материала	09Г2С	10 слоев: стеклоткань Т-23ТУ, эпоксидная смола ЭД-20
Модуль упругости	200000, МПа	50000, МПа
Коэффициент Пуассона	0,29	0,3
Массовая плотность	7900, кг/м ³	2100, кг/м ³
Предел прочности при растяжении	405, МПа	1750, МПа
Предел текучести	295, МПа	3000, МПа

Таблица 3

Результаты моделирования ремонтного узла

Table 3

Modeling results of repair assembly

Количество слоев	Напряжения на трубе, МПа	Напряжение на композите, МПа
0	368,5	–
1	378,9	94,7
3	320,6	80,16
6	280,9	70,2
7	264,3	66,07
8	266,8	62,6
9	236,7	59,18
10	225,6	38,58

На рис. 2 показан результат эксперимента № 1 при отсутствии композитного материала и, соответственно, при отсутствии ремонтного узла, разработанного на основе композитного материала.

Из рисунка видно, что при нагрузке трубы в зоне дефекта возникают напряжения выше предела текучести, исключающие эксплуатацию магистрального трубопровода. По результатам эксперимента № 8 выявлено оптимальное количество слоев композитного материала, при котором напряженно-деформированное состояние в месте нанесения ремонтного узла позволяет эксплуатацию магистрального трубопровода под избыточным давлением $P = 4$ МПа (рис. 3).

По результатам, полученным в ходе эксперимента, построена зависимость напряженно-деформированного состояния от количества слоев композитного материала, нанесенного в месте дефекта (рис. 4).

Из полученного графика зависимости напряженно-деформированного состояния на трубопроводе в месте дефекта и на поверхности композитного материала с учетом количества слоев можно получить рекомендуемый количественный состав композитного узла для ремонта магистральных трубопроводов с известными параметрами эксплуатации, дефектов и геометрическими характеристиками.

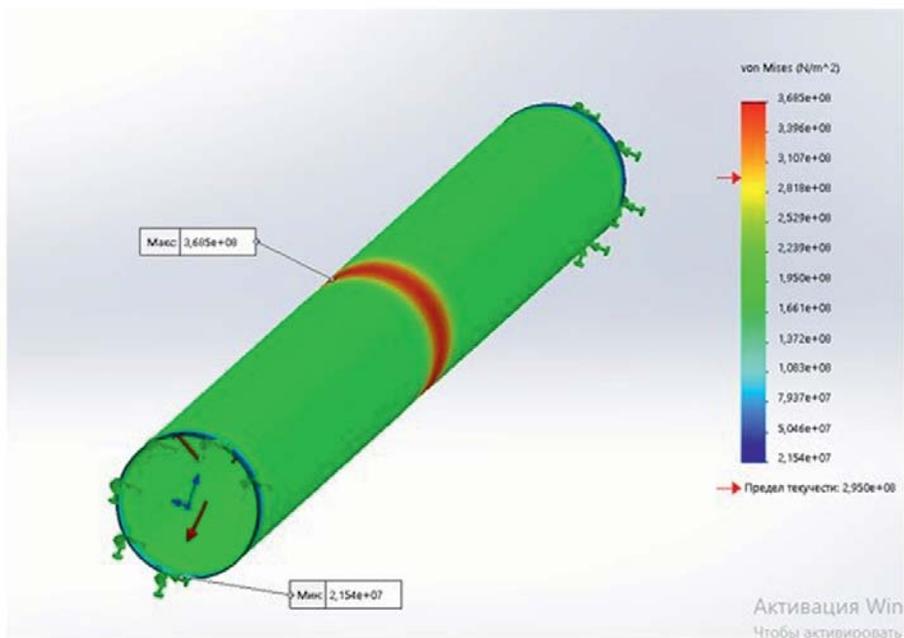


Рис. 2. Эксперимент № 1 (0 слоев композита (0 мм))
Fig. 2. Experiment No. 1 (0 layers of composite (0 mm))

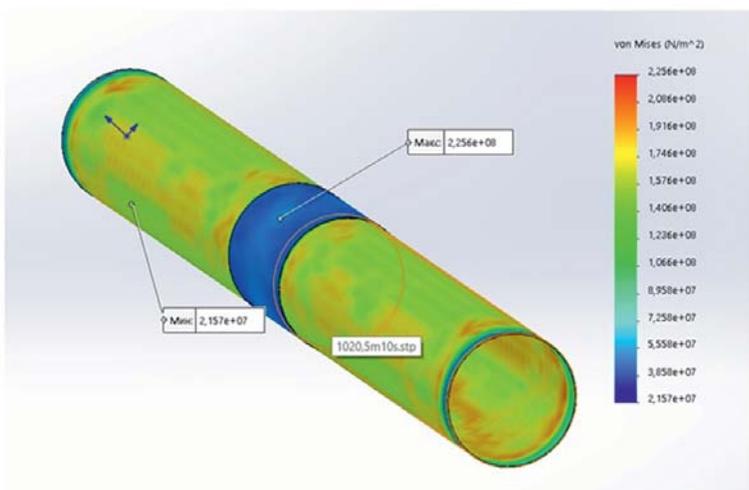


Рис. 3. Эксперимент № 8 (10 слоев композита (10 мм))
Fig. 3. Experiment No. 8 (10 layers of composite (10 mm))

Для проверки полученного графика был проведен натурный эксперимент.

Для проведения натурального эксперимента был изготовлен образец, который состоит из двух сваренных труб длиной по 250 мм, диаметром 40 мм с толщиной стенки 4 мм, а также с приваренными к обоим концам выводными планками для закрепления в захваты машины (рис. 5).

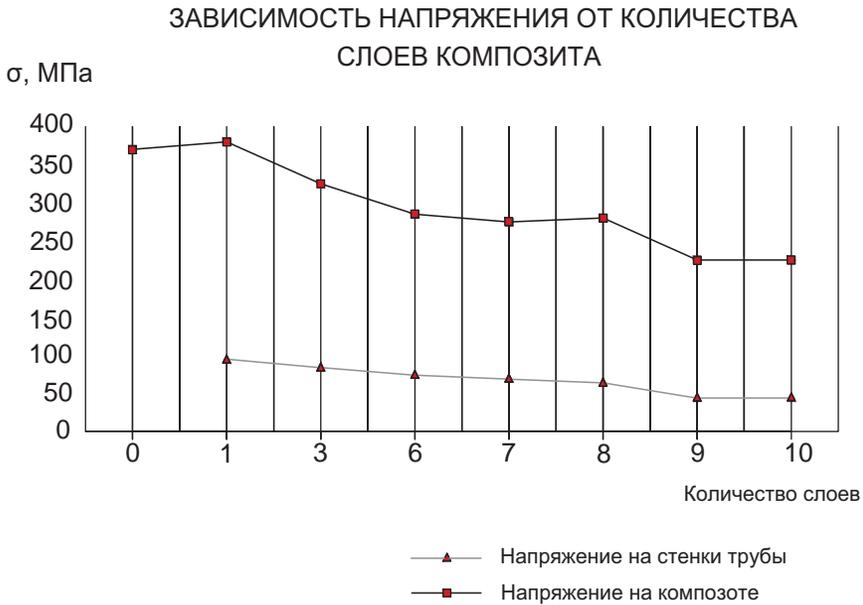


Рис. 4. График зависимости напряжений от количества слоев композитного материала
Fig. 4. Stress as a function of number of composite material layers

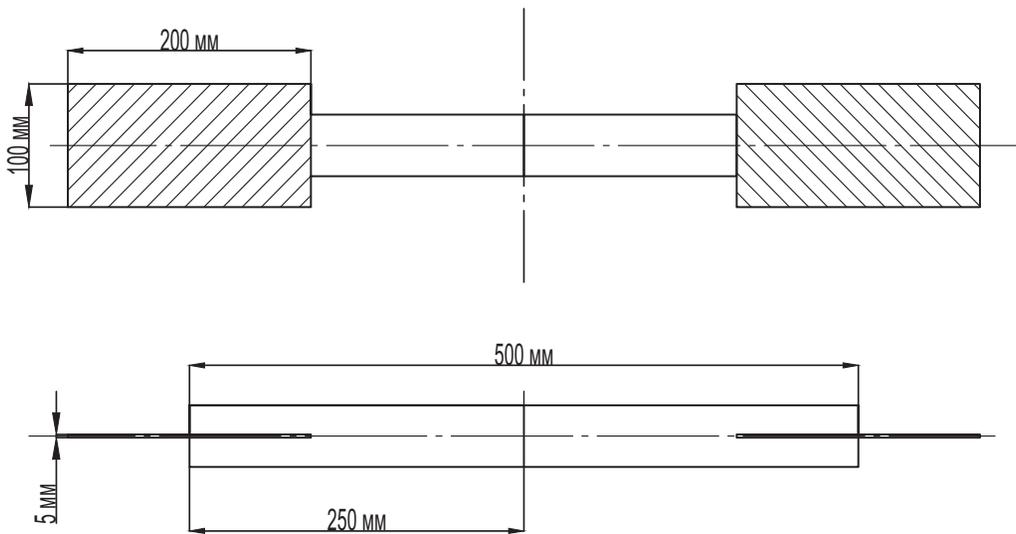


Рис. 5. Эскиз экспериментального образца без дефекта
Fig. 5. Design of experimental sample without defect

Натурный эксперимент на растяжение проводился с использованием разрывной машины для статических испытаний металлов Р-100, представленной на рис. 6.

Второй образец изготовлен аналогичным образом, с дефектом в области сварного шва и нанесенной композитной муфтой (ремонтным узлом) (рис. 7). Ремонтный узел состоит из 10 слоев композитного материала, состоящего из стеклоткани Т-23 ТУ и эпоксидной смолы ЭД-20.



Рис. 6. Установка образца на разрывную машину для статических испытаний металлов Р-100
Fig. 6. Installation of a specimen on R-100 tensile testing machine for static testing of metals

При достижении нагрузки в 146,34 кН произошло разрушение сварного шва оснастки (рис. 8).

Разрушения образца по дефектному участку не произошло, общее удлинение образца не обнаружено. На рис. 9 видны следы незначительного растяжения верхних слоев композитной системы в зоне дефекта.

Из вышесказанного можно сделать вывод, что разрушение образца в зоне пониженной прочности (дефекта сварного шва) не произошло и композитная ремонтная система позволила образцу выдержать нагрузку близкую к эксплуатационной.

Далее был смоделирован эксперимент с использованием систем автоматизированного проектирования.

Для точности первым шагом было проведено моделирование с образцом без дефекта, результаты которого представлены на рис. 10.

Максимальные напряжения возникают в области приварки плоского листа к трубе,

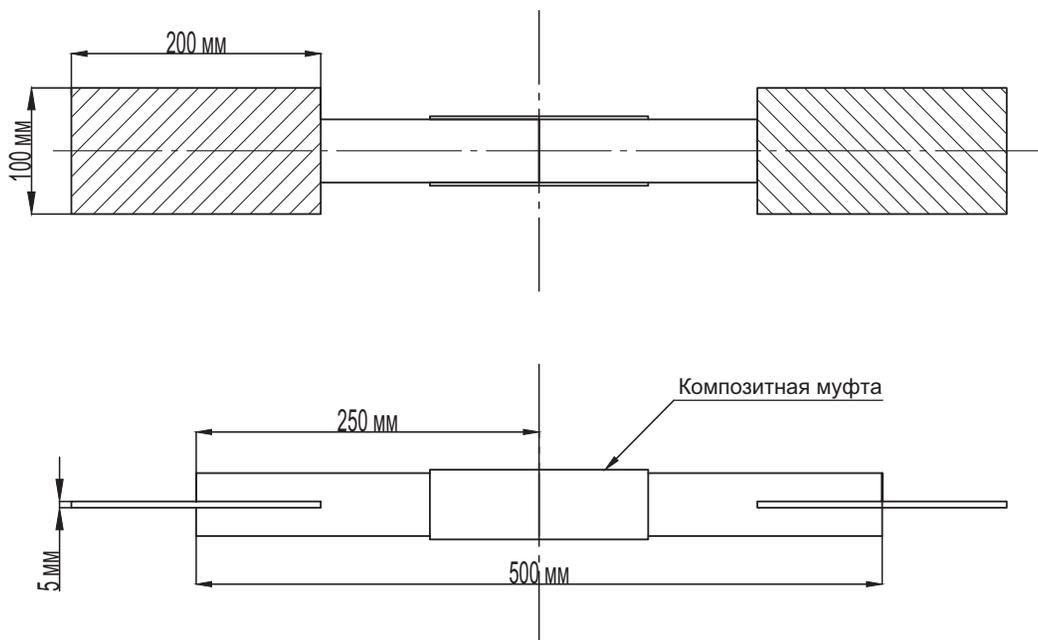


Рис. 7. Эскиз экспериментального образца с дефектом сварного шва и композитной муфтой
Fig. 7. Design of experimental sample having weld joint defect and composite coupling

а напряжения, возникающие в области сварки труб, ниже.

Далее проведено моделирование образца с дефектом, без ремонтной системы (см. рис. 11). Напряжения, возникающие в зоне дефекта, приблизительно равны пределу текучести, что указывает на то, что разрушение образца произойдет в зоне дефекта.

При проведении эксперимента в SOLIDWORKS над образцом с дефектом были проанализированы результаты при различных вариантах закрепления композитной муфты, которые представлены на рис. 12. На них можно увидеть, что напряжения, возникающие в зоне дефекта, ниже, чем без использования ремонтной системы.

Выводы

Полученные с высокой степенью достоверности результаты исследований по разработке технологии капитального ремонта магистральных трубопроводов с использованием композитных материалов позволяют рекомендовать этот метод для промышленного применения. Кроме того, предложенный метод моделирования технологии капитального ремонта магистральных трубопроводов с использованием программного продукта SOLIDWORKS позволяет существенно снизить трудоемкость и продолжительность процесса определения оптимального количественного состава композитного узла для ремонта трубопроводов по рабочим параметрам эксплуатации сооружений и по геометрическим размерам дефектов.



Рис. 8. Разрушение сварного шва оснастки
Fig. 8. Failure of fitting weld joint



Рис. 9. Зона дефекта сварного шва после проведения эксперимента
Fig. 9. Weld joint defect area after experiment

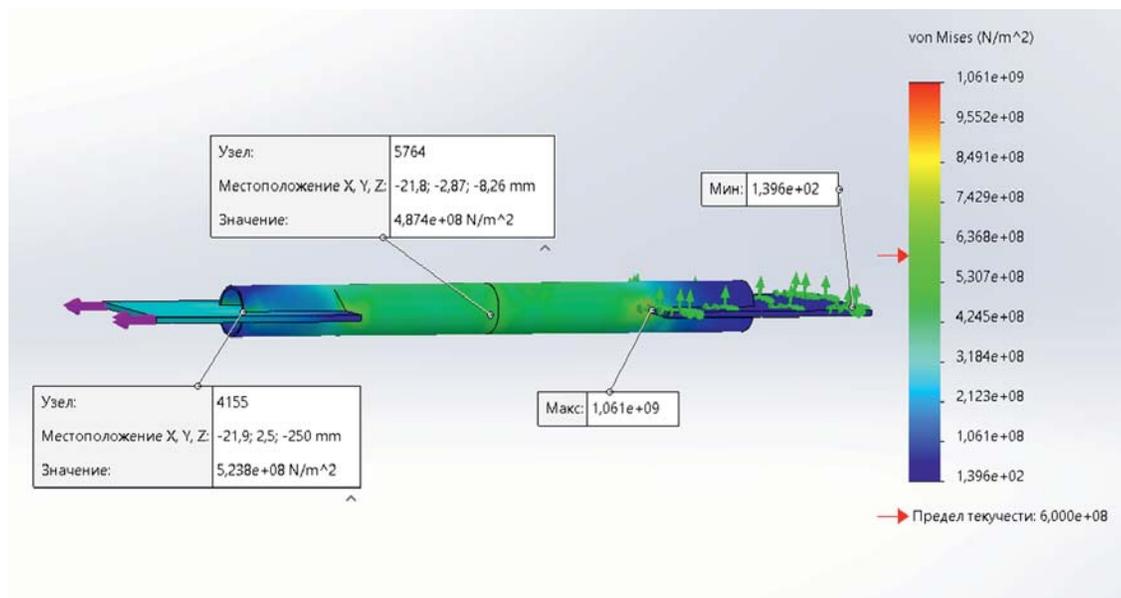


Рис. 10. Результаты моделирования на образце без дефекта
Fig. 10. Modelling results for sample having no defect

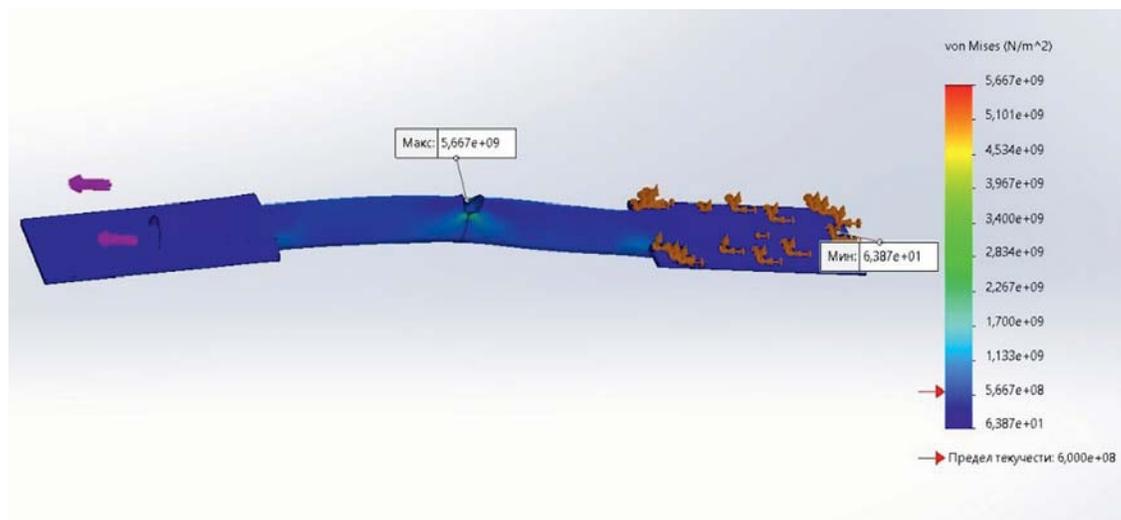


Рис. 11. Результаты моделирования на образце с дефектом
Fig. 11. Modelling results for sample having a defect

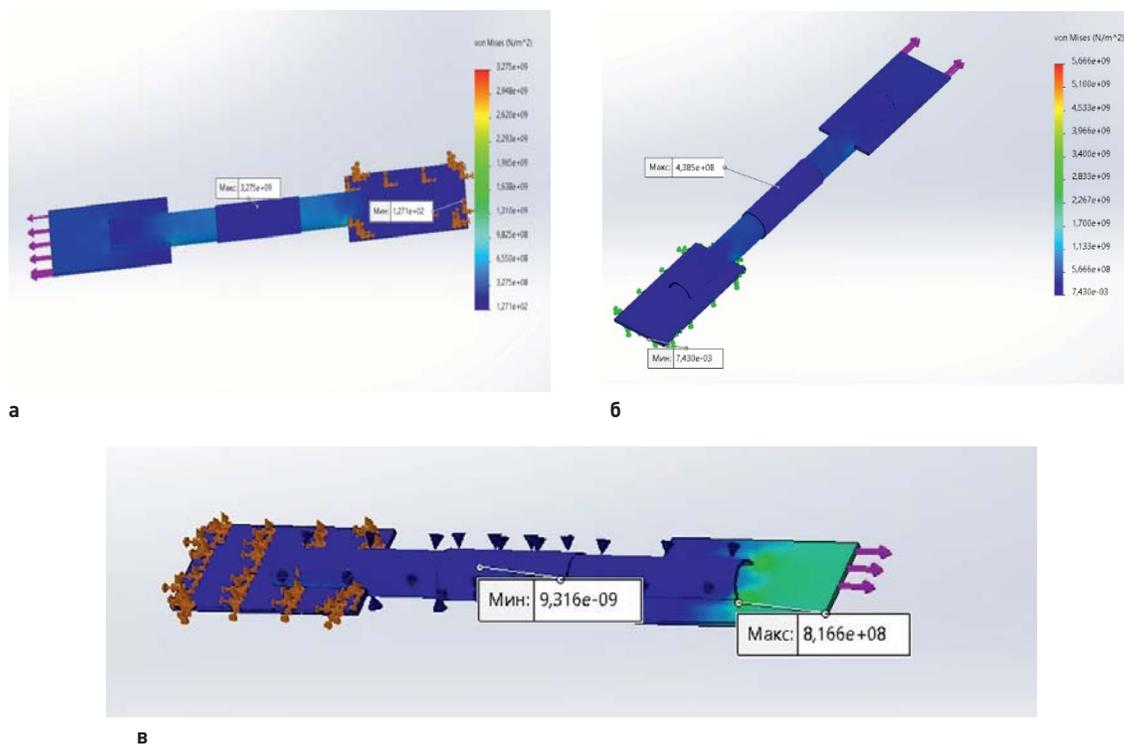


Рис. 12. Результаты эксперимента на образце с дефектом с различным соединением муфты к трубе с дефектом: а – клеевое соединение, клей гибкий; б – клеевое соединение, клей жесткий; в – жесткая фиксация трубы и муфты
Fig. 12. Experimental results for a sample having a defect when using various connections of coupling to damaged pipe: а – adhesion joint – soft glue; б – adhesion joint – rigid glue; в – rigid fixation of pipe and coupling

Список литературы

1. Р Газпром Инструкция по оценке дефектов труб и соединительных деталей при ремонте и диагностировании магистральных газопроводов: дата введения. 01.02.2009 / разработана Обществом с ограниченной ответственностью «Газнадзор». – М.: ОАО «Газпром», 2009. – 110 с.
2. РД-23.040.00-КТН-140-11. Методы ремонта дефектов и дефектных секций действующих магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов: дата введения 14.04.2007. – М.: ОАО «АК «Транснефть», 2008. – 140 с.
3. Восстановление несущей способности магистральных нефтегазопроводов с помощью композитных материалов / Б.И. Мирошниченко [и др.] // Третья международная конференция «Безопасность трубопроводов»: сб. докл. – М., 1999. – Т. 1. – С. 100–105.
4. Ахтимиров Н.Д. Технико-экономическое обоснование применения конструкции «труба в трубе» при строительстве и ремонте линейной части магистральных трубопроводов / Н.Д. Ахтимиров, В.Н. Лисин, В.М. Шарыгин. – М.: ВНИИЭгазпром, 1989. – 18 с.
5. Hierarchical Analysis on Repair Material for External Coating of Buried Pipeline / T.A.O. Youzhuo, M.A. Tingxia, L.I. Zhenjun, T.A.O. Ting // Corrosion Science and Protection Technology. – 2019. – Vol. 31, no. 6. – P. 603–608.
6. True W.R. Composite wrap approved for U.S. gas-pipeline repairs / W.R. True // Oil & Gas Journal. – 1995 Oct. 9. – P. 67–71.
7. Bruce W.A. Pipeline Repair Using Full-Encirclement Repair Sleeves / W.A. Bruce, J. Kiefne // Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook / ed. R. Winston. – Wiley, 2015. – P. 635–656. <https://doi.org/10.1002/9781119019213.ch44>
8. Systems for Repair and Rehabilitation of Corroded Oil & Gas Pipelines [Electronic Resource] / L.K. Sing, S.N.A. Azraai, M. Noor, N. Yahaya // JURUTERA. – 2016 November. – URL: <https://www.researchgate.net/> [accessed: 30.04.2020].

9. Перспективный метод ремонта трубопроводов / Б.А. Ключ, А.А. Ермаков, В.Г. Поляков, А.С. Диденко // Газовая промышленность. – 1989. – № 3. – С. 45–47.
10. Усиливающий эффект композиционных муфт, применяемых для ремонта газопроводов / В.М. Шарыгин, И.В. Максютин, А.Я. Яковлев, С.Г. Алеников // Транспорт и подземное хранение газа: научно-технический сборник. – Москва: Газпром, 2002. – Т. 4. – С. 10–18.
11. Воробьев И.Н. Преимущество применения композитных материалов при ремонте трубопроводов / И.Н. Воробьев // Экспозиция. Нефть. Газ. – 2013. – № 7. – С. 47–50.
12. Modeling a composite assembly for repair of trunk pipelines / Z.R. Mukhametzyanov, P.A. Kulakov, A.V. Rubtsov, Yu.A. Churakov // Journal of Physics: Conference Series. – 2020. – Vol. 1582. – P. 25–32. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1582/1/012055>
13. Композитная система с однонаправленными волокнами для ремонта и армирования конструкций: пат. RU 2706663 / К.Дж. Лаззара, Д. Пегуеро, Р.Дж. Лаззара, В.Минниканти. – Опубл. 23.04.2018.
14. Универсальный ремонтный комплект для трубопроводов: пат. RU 2730268 / В.А. Закамалдина. – Опубл. 21.08.2020.
15. Стяжной хомут для ремонта трубопроводов: пат. RU 189577U1 / В.С. Сум, К.К. Леон, И.Л. Леон [и др.]. – Опубл. 28.05.2019.
16. Способ локального ремонта действующего трубопровода: пат. RU 2729581 / В.И. Паутов. – Опубл. 11.08.2020.
17. Бондарева Т.П. Достоинства и недостатки в сравнительном анализе систем SOLIDWORKS и Autodesk Inventor / Т.П. Бондарева, Н.В. Морозова // Актуальные проблемы гуманитарных и естественных наук. – 2017. – № 4. – С. 88–93.
18. Modeling a stressed-deformed state of a technological pipeline with a displacement of edges / A.V. Rubtsov, P.A. Kulakov, Z.R. Mukhametzyanov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry. ITBI 2020. – 2020. – Vol. 1661, no. 1. – P. 012078. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012078>
19. Modeling a stressed-deformed state of a technological apparatus / A.V. Rubtsov, P.A. Kulakov, Z.R. Mukhametzyanov [et al.] // Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. – Vol. 1661, no. 1. – P. 012079. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012079>

References

1. LLC "Gaznadzor". R Gazprom Instructions for the assessment of defects in pipes and fittings during the repair and diagnostics of main gas pipelines. Moscow: JSC Gazprom; 2009 (in Russian).
2. RD-23.040.00-KTN-140-11. Methods for repairing defects and defective sections of existing oil trunk pipelines and oil product pipelines. Moscow: JSC Transneft; 2008 (in Russian).
3. *Miroshnichenko B.I., et al.* Restoration of the bearing capacity of main oil and gas pipelines using composite materials. In: Proceedings of the 3rd International Conference "Pipeline Safety". Moscow; 1999. p. 100–105 (in Russian).
4. *Akhtimirov N.D., Lisin V.N., Sharygin V.M.* Feasibility study for the application of the "pipe-in-pipe" design in the construction and repair of the linear part of trunk pipelines). Moscow: VNIIEgazprom; 1989 (in Russian).
5. *Youzhuo T.A.O., Tingxia M.A., Zhenjun L.I., Ting T.A.O.* Hierarchical Analysis on Repair Material for External Coating of Buried Pipeline. Corrosion Science and Protection Technology. 2019;31(6):603–608.
6. *True W.R.* Composite wrap approved for U.S. gas-pipeline repairs. Oil & Gas Journal. 1995; Oct. 9:67–71.
7. *Bruce, W.A., Kiefner J.* Pipeline Repair Using Full-Encirclement Repair Sleeves. In: Winston R., ed. Oil and Gas Pipelines: Integrity and Safety Handbook. Wiley; 2015. p. 635–656. <https://doi.org/10.1002/9781119019213.ch44>
8. *Sing L.K., Azraai S.N.A., Noor M., Yahaya N.* Systems for Repair and Rehabilitation of Corroded Oil & Gas Pipelines. JURUTERA. 2016 November. Available at: <https://www.researchgate.net/> [Accessed: 30 April 2020].
9. *Klyuk B.A., Ermakov A.A., Polyak V.G., Didenko A.S.* A promising pipeline repair method. Gazovaya promyshlennost = GAS Industry of Russia. 1989;(3):45–47 (in Russian).
10. *Sharygin V.M., Maksyutin I.V., Yakovlev A.Ya., Alennikov S.G.* The reinforcing effect of composite couplings used for the repair of gas pipelines. In: Transport i podzemnoe khranenie gaza: nauchno-tekhnicheskii sbornik. Vol. 4. Moscow: Gazprom, 2002. p.10–18 (in Russian).
11. *Vorobev I.N.* Advantage of using composite materials in pipeline repair). Ekspozitsiya. Neft. Gaz = Exposition Oil & Gas. 2013;(7):47–50 (in Russian).

12. *Mukhametzyanov Z.R., Kulakov P.A., Rubtsov A.V., Churakov Yu.A.* Modeling a composite assembly for repair of trunk pipe-lines. Journal of Physics: Conference Series. 2020;1582:25–32. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1582/1/012055>
13. *Lazzara K.Dh., Pegyero D., Lazzara R.Dh., Minnikanti V.* Composite system with unidirectional fibers for repair and reinforcement of structures. Patent RU no. 2706663. Date publ. 23.04.2018. [in Russian].
14. *Zakamaldina V.A.* Universal piping repair kit. Patent RU no. 2730268. Date publ. 21.08.2020.[in Russian].
15. *Sum V.S., Leon K.K., Leon I.L., Dyukich L.F., Falzon P.Dz., et al.* Clutch for Welding Repairs. Patent RU no. 189577. Date publ. 28.05.2019. [in Russian].
16. *Pautov V.I.* Method for local repair of an existing pipeline. Patent Ru no. 2729581. Date publ. 11.08.2020.
17. *Bondareva T.P., Morozova N.V.* Advantages and Disadvantages of Comparative Analysis of SOLIDWORKS and Autodesk Inventor Systems. *Aktualnye problemy gumanitarnykh I estestvennykh nauk [Aktualnye problemy gumanitarnykh I estestvennykh nauk]*. 2017;(4):88–93.
18. *Rubtsov A.V., Kulakov P.A., Mukhametzyanov Z.R., Farshatov A.R., Bayazitov M.I., Kovshova Y.S., Gimaltidinov I.K.* Modeling a stressed-deformed state of a technological pipeline with a displacement of edges. Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. 2020;1661(1):012078. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012078>
19. *Rubtsov A.V., Kulakov P.A., Mukhametzyanov Z.R., Bayazitov M.I., Arkhipova K.S., Gimaltidinov I.K.* Modeling a stressed-deformed state of a technological apparatus / Journal of Physics: Conference Series. 2020 International Conference on Information Technology in Business and Industry, ITBI 2020. 2020;1661(1):012079. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1661/1/012079>

Информация об авторах / Information about the authors

Зинур Ришатович Мухаметзянов[✉], д-р техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа

e-mail: zinur-1966@mail.ru

тел.: +7 (917) 780-35-05

Zinur R. Mukhametzyanov[✉], Dr. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Highways and Structural Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

e-mail: zinur-1966@mail.ru

tel.: +7 (917) 780-35-05

Наталья Эдуардовна Урманшина, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автомобильные дороги и технология строительного производства» ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа

e-mail: adtsp@mail.ru

тел.: +7 (917) 347-62-40

Nataliia E. Urmanshina, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor of the Department of Highways and Structural Engineering, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

e-mail: adtsp@mail.ru

tel.: +7 (917) 347-62-40

Раян Альфирович Фаюршин, студент группы БГРи-18-01 ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной технический университет», Уфа

e-mail: fayurshinr@gmail.com

Ryan A. Fayurshin, student of group BGRi-18-01, Ufa State Petroleum Technological University, Ufa

e-mail: fayurshinr@gmail.com

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 101.1

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-154-162](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-154-162)

У ИСТОКОВ НАУЧНОГО ЗНАНИЯ. ДРЕВНЕВОСТОЧНЫЕ ЗНАНИЯ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА БУДУЩЕЕ НАУКИ

В.И. НИКИТИН, канд. ист. наук

АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, к. 5, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

В статье отмечается, что в абсолютном большинстве научных работ и учебной литературы по истории науки ее зарождение относят, как правило, к периоду Античной Греции или же к эпохе Возрождения в XV–XVII вв. в Европе. Подобный евроцентричный подход, на наш взгляд, является недостаточно убедительным. В представленном материале предпринята попытка на конкретных примерах продемонстрировать, что первые и достаточно глубокие научные знания впервые появляются на Древнем Востоке, а натурфилософы и мыслители Античной Греции и так называемого Эллинского мира нередко их либо заимствовали, либо использовали как основания для своих открытий, зачастую не указывая первоисточников. В подтверждение этому в статье раскрывается история зарождения первых научных знаний в ряде стран Древнего Востока, их содержательная часть, воздействие на развитие и устройство древневосточных цивилизаций, а также их влияние на формирование целых отраслей будущей науки и техники. Особое внимание при этом обращено на практическое применение этих теоретических знаний в целом ряде прикладных отраслей хозяйственной деятельности, таких как строительство, архитектура, сооружение дорог, гидротехническое строительство и ряд других. В то же время в заключительной части статьи выявляются причины ограниченности и утилитарности этих знаний. Они, как правило, функционировали как набор готовых рецептов деятельности, отсутствовала их критическая оценка, рациональное обоснование, системе доказательств не придавалось особого значения. Все это в совокупности, а также ряд других факторов в конечном счете не позволили сформировать на их базе фундаментальные основания для возникновения подлинной науки.

Ключевые слова: Древний Восток, знания, научные знания, наука, математика, строительство, гидротехнические сооружения, дороги

Для цитирования: Никитин В.И. У истоков научного знания. Древневосточные знания и их влияние на будущее науки // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 154–162. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-154-162](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-154-162)

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.

ORIGINS OF SCIENTIFIC KNOWLEDGE. ANCIENT ORIENTAL STUDIES AND THEIR IMPACT ON THE FUTURE OF SCIENCE

V.I. NIKITIN, Cand. Sci. (History)

JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, bld. 5, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

This article argues that contemporary research and educational literature attributes the birth of science to Ancient Greece or the Renaissance period in Europe during the 15th–17th centuries. Such a Eurocentric approach, in the author's opinion, is insufficiently convincing. The article provides specific examples to demonstrate that sophisticated scientific knowledge first appeared in the Ancient East, while the natural philosophers and thinkers of Ancient Greece and the so-called Hellenic world either appropriated this knowledge or used it as a basis for their discoveries, often without mentioning the original source. As evidence, the article discloses the history behind the origin of primary scientific knowledge in a number of countries in the Ancient East, its content and impact on the development of ancient eastern civilizations and science as a whole. Particular attention is paid to the practical application of theoretical knowledge in several applied fields of economic activity, such as construction, architecture, road building, hydraulic engineering, and others. In conclusion, the article reveals reasons for the limitation and utilitarianism of this knowledge, since it provided only ready-made solutions lacking critical evaluation and rational justification. Moreover, the system of evidence was rarely considered important. All these factors ultimately prevented the formation of a system of fundamental science.

Keywords: Ancient East, knowledge, scientific knowledge, science, mathematics, construction, hydraulic structures, roads

For citation: Nikitin V.I. Origins of scientific knowledge. Ancient oriental studies and their impact on the future of science. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 154–162 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-154-162](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-154-162)

Author contribution statement

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

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The author declares no conflict of interest.

Казалось бы, такой простой вопрос, как изложение истории науки и ее философской интерпретации, на деле оказывается далеко неоднозначным и порождает множество точек зрения. Как, когда и где зародилась наука – на эти вопросы ученые до сих пор дают далеко неоднозначные ответы. Многие исследователи истории и философии науки, как правило, начинают реконструкцию ее зарождения со времен Античной Греции, другие – с конца XVII в. в Европе. Подобный евроцентричный подход, на наш взгляд, не совсем правомерен, так как при этом принижается значение вклада стран Древнего Востока в зарождение научного знания.

Общеизвестно, что колыбелью общечеловеческой цивилизации были страны Востока: Шумерское и Вавилонское царства в Месопотамии, Египет, Индия и Китай. Уже 8–6 тысяч лет тому назад цивилизации древних Шумера, Вавилона и Египта обладали довольно

глубокими знаниями в области математики, астрономии, химии, географии, строительной механики, гидрологии, металлургии, медицины, ботаники, анатомии, архитектуры, гидротехнических сооружений и т. п.

Древние математики Вавилона и Египта умели решать задачи на «уравнение первой и второй степени, на равенство и подобие треугольников, на арифметическую и геометрическую прогрессию, на определение площадей треугольников и четырехугольников, объема параллелепипедов» [1]. Им были известны формулы расчета объема цилиндра, конуса, пирамиды, усеченной пирамиды и т. п., а также единичные дроби, простое и двоичное умножение. Они умели вычислять поверхность трапеции и даже круга, установив формулу отношения длины окружности к диаметру $\pi = 3,14$ (современные расчеты $\pi = 3,14159\dots$) или правило о «квадрате шестнадцати девятых», согласно одной из рукописей XVIII династии (около 2760 г. до н. э.).

Египетскими жрецами был составлен первый в мире солнечный календарь, согласно которому год делился на 12 месяцев и 365 дней. Месяц состоял из 30 дней и делился на три декады по 10 дней каждая. В конце года к 36 декадам добавлялась одна полудекада (пять дней).

Однако не обладая способностью согласовывать календарный и астрономический годы из-за того, что ежегодный утренний восход Сириуса, означавший начало разлива Нила и тем самым наступление календарного Нового года, расходился с астрономическим годом на один день, в конце концов через 120 лет начало года оказалось сдвинутым на четыре месяца (120 дней), что потребовало в дальнейшем создания сложных и громоздких корреляционных таблиц.

Сутки у древних египтян делились на 24 часа, причем они выглядели довольно своеобразно. Суточное время подразделялось на 10 дневных часов, 12 – ночных и два – сумеречных.

Они создали первые карты звездного неба, насчитывавшие до 5 тысяч звезд, планет и астероидов, попытались сгруппировать созвездия, вели наблюдения за планетами.

В Древнем Вавилоне еще в шумерскую эпоху (IV тысячелетие до н. э.) существовала шестидесятеричная позиционная система счисления, от которой до наших дней дошло деление круга на 360° , часа – на 60 минут и минуты – на 60 секунд. Вавилонянам (в отличие от египтян, которые знали только сложение и умножение, а дроби представляли как деление целого на части) были известны четыре правила арифметики, начала алгебры, простые дроби, возведение в квадрат, куб, а также извлечение корней. Имели хождение таблицы умножения, обратных величин, решений уравнений типа $X^3 + X^2 = P$ и т. п.

В области астрономии они выделили из числа звезд пять планет и вычислили их орбиты. Наблюдая за лунными фазами, они первыми создали лунный календарь, распадавшийся на год (120 дней), месяцы, сутки, часы, минуты (так, сутки состояли из 12 часов, а каждый час включал 30 минут).

В Индии, как и в Египте, был создан солнечный календарь, деливший год на 12 месяцев по 30 дней каждый и предусматривавший добавочный месяц через каждые пять лет. Древние индусы знали, что Земля круглая и вращается вокруг своей оси. Одно из выдающихся достижений Древней Индии – это создание позиционной десятичной системы исчисления с применением нуля (III–II тысячелетие до н. э.) – той, которой до сих пор пользуемся и мы, и легшей в основу современной арифметики. Чтобы оценить достоинство этой системы, достаточно сравнить ее хотя бы с римской. Так, число 4888, записанное по этой системе,

на латыни будет выглядеть следующим образом: MMMMDCCLXXXVIII. Историческая несправедливость заключается в том, что во всем мире эти цифры называют арабскими, так как европейцы заимствовали их у арабов, хотя сами арабы называют их индийскими. Кстати, понятия «цифра», «синус», «корень» впервые появились также в Древней Индии. К этому следует добавить, что индусы накопили значительные познания в области анатомии и медицины, особенно в сфере траволечения.

В Древнем Китае значительное развитие получила астрономия: существовали карты звездного неба, предсказывались с достаточно высокой точностью солнечные затмения и появления комет. До нашего времени дошли древнекитайские обширные агрономические трактаты, а также географические труды, позволяющие сделать вывод, что их авторы были знакомы с началами математической географии.

Считается общепризнанным, по крылатому выражению древнеримского оратора Цицерона, что «отцом истории» является древнегреческий путешественник Геродот (V в. до н. э.) В действительности же историческая наука появляется на 100 лет ранее и родиной ее является не Греция, а Китай. Первым историческим сочинением, появившимся в VI в. до н. э., является летопись «Чунь Цю» («Весны и осени»), отредактированная и откомментированная самим Конфуцием. Само понятие «история» (шу) впервые появляется в сочинении «Шу цзин» («Книга истории»), создание которого тоже приписывается Конфуцию. В нем события рассматриваются с глубокой древности, вплоть до XVIII в. до н. э. В целом от китайской древности до нас дошли около 30 исторических сочинений.

Не надо забывать о том, что именно в Древнем Китае (XVIII–XII вв. до н. э.) были изобретены бумага, порох, компас, сейсмограф, книгопечатание, механические часы, техника шелкоткачества. В связи с широким использованием и охраной водных ресурсов в Китае получили развитие физика и гидротехника, в медицине – иглоукалывание, диетология, лечебная гимнастика и т. д.

И, наконец, мы должны помнить, что появлением письменности (будь то клинопись вавилонян, пиктография египтян, алфавит из 22 букв финикийцев, иероглифы китайцев), без которой немислима наука, мы также обязаны Древнему Востоку.

Сами древние греки, часто скрывавшие источники и авторство высказываемых ими идей, признавали, что геометрия как прикладная наука впервые появилась в Египте. Аристотель объяснял это наличием свободного времени у жрецов. Геродот, побывав в Египте, трактовал ее появление практической необходимостью. «Когда Нил заливал участки обработанной земли, – отмечал он, – то с точки зрения обложения нужно было установить, сколько земли было потеряно, – это было, как кажется, начало геометрии, которая отсюда перешла в Грецию» [2]. Уже само греческое название «геометрия», как учение об измерении земли, говорит о практическом его происхождении.

Известно, что Фалес Милетский многие свои знания почерпнул в Египте, где он неоднократно бывал по торговым делам. Пифагор в течение 12 лет изучал священную науку чисел или всемирных принципов, то есть математику, у египетских жрецов, а Евклид, живший в египетской Александрии, широко заимствовал их знания при создании своей знаменитой геометрии.

И, очевидно, прав египтолог И. Шмелев, писавший, что не греки были первооткрывателями фундаментальных законов развития, а жрецы Древнего Египта, греки же или их заимствовали, или открывали заново. Можно согласиться с образной оценкой российского философа

науки Т.Г. Лешкевича, что «...правильнее было бы говорить о священном значении Египта, удочерившего Элладу» [3].

Необычайно высокого уровня на Древнем Востоке достигло строительное искусство, которое без соответствующих научных знаний возникнуть бы не могло. Неслучайно многие из дошедших до наших дней его объектов заслуженно включены в мировое культурное наследие ЮНЕСКО.

Когда речь заходит о древневосточных памятниках строительного искусства, то в первую очередь вспоминаются египетские пирамиды и сфинксы в долине Гизы, а также Луксорский и Карнакский храмовые комплексы, когда-то соединенные между собой трехкилометровой аллеей сфинксов с телом льва и головой барана. Все они являются крупнейшим в мире музеем под открытым небом и принадлежат к шедеврам мирового зодчества.

До 1300 г. в течение почти четырех тысячелетий, пока не был построен кафедральный собор в Линкольне, самым высоким сооружением в мире являлась 147-метровая пирамида Хеопса (сейчас ее высота составляет не многим более 138 м), построенная из более чем двух миллионов блоков, каждый весом от двух тонн и более. Общий вес пирамиды составляет порядка 6,7 млн тонн. Сорок пять столетий тому назад всего за один век было построено 232 пирамиды, из которых до наших дней сохранилось только 80.

Все они являются чудом древнего строительного зодчества, наглядным памятником не только гения человеческой мысли, точного научного и инженерного расчета, но и трудовых возможностей людей даже в те далекие времена – людей, вооруженных долотом из меди (бронзы еще не было), каменными молотами, салазками и канатами. Трудно представить себе, что с помощью таких орудий труда из огромной скалы известняка был вырублен знаменитый Сфинкс высотой 21 м и длиной 75 м. Или подобным образом была вырублена в скальной породе на глубине более 90 м гробница фараона Сети.

Гораздо менее известен, но не менее впечатляющ Баальбекский храмовый комплекс в долине Бекаа (Ливан), первые упоминания о котором встречаются в египетских документах XIV в. до н. э. времен фараона Эхнатона. Кто построил террасу, являющуюся основанием комплекса и состоящую из двух слоев, точно неизвестно. Ее размеры, казалось бы, не так уж велики: 170 м на 275 м. Но поражает другое. Нижний ее слой – площадка из каменных плит весом каждая в 360 т, верхний же слой составлен из плит длиной 21 м и массой от 800 до 1000 т. Для сравнения, самый крупный блок пирамиды Хеопса (камень над входом в камеру фараона) весит 35 т. А самый большой блок в Баальбеке под названием «Южный камень», который так и остался в каменоломне, но явно был подготовлен для террасы, и вовсе достигает веса 1050 т. Даже при современных строительных технологиях трудно представить себе, как такие буквально мегалитические плиты человек тех времен мог вырубить в скальном грунте, доставить к месту укладки и поднять на высоту в 7 м.

Не менее выдающиеся достижения были достигнуты в области градостроения, строительства оборонительных сооружений, ирригационных сооружений, а также дорог. Достаточно привести для подтверждения ряд следующих примеров.

В 1911 г. археологи обнаружили, а с 1922 г. начали раскопки города Мохенджо-Даро (так называемый «Холм мертвецов» в Пакистане), относившегося ко временам цивилизации Хараппи в Древней Индии (III–II тысячелетия до н. э.), существовавшей еще до вторжения ариев в Индостан и которая является современницей цивилизаций древних Месопотамии

и Египта. Всего было раскопано более 1000 поселений (из них 24 города). На ее территории проживало порядка пяти миллионов человек.

Город имел квадратную форму, был разделен на кварталы одинакового размера, улицы прямые и достаточно широкие, пересекающиеся под прямым углом. Здания были построены из обожженного кирпича в основном двухэтажной застройки, но отдельные из них достигали высоты современных семиэтажных домов. Что особенно поразило археологов при раскопках – это канализационная городская система с магистральными каналами, канализационными люками, отстойниками и стоками для отвода бытовых и дождевых вод, а также общественные туалеты. Многие дома имели специальные комнаты для омовений, придомовые колодцы и даже внутридомовые канализационные сооружения.

В Древнем Китае впервые в мире был использован каркасный метод в строительстве, применена двухскатная крыша, а в IV в. до н. э. был изобретен кронштейн, что позволило создать качественно новый тип архитектурной постройки, получившей широкое распространение в странах Юго-Восточной Азии и Японии – пагода.

Всему миру известен такой выдающийся памятник древнего инженерно-оборонительного зодчества как Великая Китайская стена – самое длинное и грандиозное оборонительное сооружение в истории человечества. В 2012 г. китайскими специалистами была замерена ее длина, которая со всеми ответвлениями составила 21 196 км. Строили ее с определенными перерывами почти два тысячелетия (с начала III в. до н. э. и вплоть до 1644 г.) и в отдельные времена на ее строительство сгонялось до 20 % населения страны. Высота стены на отдельных участках достигает от 6 до 10 м, а ширина 5–8 м. Сейчас это одно из самых посещаемых туристами мест в мире.

В эпоху Цинь было построено и выдающееся гидротехническое сооружение – Великий Китайский канал. Он достигал 32 км в длину и соединял реки Янцзы и Хуанхэ. По нему осуществлялось круглогодичное судоходство по внутренним водным путям суммарной протяженностью более 2000 км.

Сравнительно недавно китайские археологи обнаружили одну из самых древних в мире систему дамб, построенную примерно от 4,7 до 5,1 тыс. лет назад в провинции Чжэцзян (Восточный Китай). Она состоит из 11 дамб, длина самой протяженной из которых составляет 6,5 км. Ни одна страна в мире не имела не только в те времена, но и значительно позже ничего подобного.

Воображение современников до сих пор поражает простотой, надежностью и точностью гидротехнических расчетов построенная более 2200 лет тому назад всего за 8 лет (256–248 гг. до н. э.) без единой плотины ирригационная система Дуизяньнянь в провинции Сычуань, которая до сих пор наполняет многочисленные каналы водой на площади в 670 тыс. га. Благодаря ей эта земля еще в глубокой древности стала основной житницей Китая.

Необходимо сказать несколько слов о дорожном строительстве на Древнем Востоке. В исторической литературе общепризнано, что строительство мощенных камнем дорог появилось в Древнем Риме в период его расцвета. В действительности это далеко не так. В Древней Ассирии впервые появляется массовая регулярная профессиональная наемная армия, ударную силу которой составляли боевые колесницы. Для ее быстрой переброски из одного конца огромной империи в другой для подавления постоянно вспыхивавших вооруженных восстаний покоренных народов, а также для завоевательных походов там впервые в мировой истории стали строить мощенные камнем дороги, возведение которых примерно

через 1000 лет достигло наивысшего расцвета во времена Римской империи. Кстати, в том же Китае в Циньскую эпоху (III в. до н. э.) было построено 8000 км мощеных дорог.

Но почему же все-таки Древний Восток не стал колыбелью рождения науки? На этот вопрос можно попытаться дать следующий ответ. Древневосточные цивилизации были в основном странами с поливным земледелием. Разливы рек и вытекающая из этого необходимость количественных оценок затопляемых площадей с целью их налогообложения стимулировали развитие геометрии; торговля, ремесленная, а также строительная деятельность обусловили разработку приемов вычисления и счета. Мореплавание, военные походы, отправление культов способствовали выработке методов ориентации в пространстве и во времени и привели к возникновению «звездной науки», то есть астрономии и т. д., и т. п.

Таким образом, научные знания на Древнем Востоке были ориентированы на решение в основном утилитарно-прикладных задач. Это была первая и главная особенность зарождения научного знания на Древнем Востоке, наглядно подтверждающая непреходящую ценность изречения, что «нужда была матерью всех изобретений» и, добавим от себя, открытий тоже.

Вторая особенность зарождения знаний на Древнем Востоке выражалась в следующем. Господство деспотий или иерократий объективно приводило к тому, что выработкой и хранением знаний занималась небольшая часть привилегированного общества, главным образом жрецы. Поэтому передача знаний в социуме осуществлялась по принципу наследственного профессионализма как божественный промысел бога-покровителя. Поэтому отсутствовала их критическая оценка, системе доказательств не придавалось особого значения, процессы изменения знаний протекали стихийно по принципу: «потребность–поиск–ответ».

Замедленность развития экономических, социально-политических и культурных процессов приводило к тому, что знание функционировало как набор готовых рецептов деятельности, носящих разрозненный характер, что способствовало отсутствию их рациональной обоснованности во времени и лишало древневосточную «науку» (как некую сумму знаний) фундаментальности.

Все это и многое другое (что является предметом «чистой» истории) объясняет, как зародились научные знания на Востоке, почему они были значительными только в определенных областях, и в то же время помогают понять, почему Древний Восток объективно не мог стать колыбелью науки.

В то же время, часто звучащие у отдельных авторов утверждения, что знанию Востока присуща бездоказательность и априорность, локальная единичность и т. д., на наш взгляд, не всегда носят объективный характер.

Говорят, что «наука начинается там, где начинают мерить», и это утверждение полностью относится к Древнему Востоку. Это, во-первых. Во-вторых, ряд знаний, в частности в области математики в древних Египте и Вавилоне, очевидно, не мог быть получен вне процедур вывода и доказательства. В частности, историк математики М.Я. Выгодский считал, что, например, такие сложные расчеты, как алгоритм вычисления объема усеченной пирамиды, были выведены на основе других знаний [4].

В-третьих, отдельные научные знания Древнего Востока стали основой формирования как «древнегреческого чуда», так и научных открытий в последующие века. Добавим к этому еще ряд примеров. Известно, в частности, что при создании своей гелиоцентрической теории Коперник использовал вавилонский и египетский календари в своих лунной и планетарной

таблицах. А двоичный принцип умножения древних египтян широко используется в современных электронно-вычислительных машинах.

В-четвертых, очевидно не бесспорным является тезис многих современных исследователей, что философия древних Вавилона и Египта носила зачаточный характер, а в древних Индии и Китае выступала как религиозно-идеологическое учение, обслуживавшее традицию и регулировавшее поведение и деятельность людей [5].

С этим можно согласиться, но только с определенными оговорками. Дело в том, что реконструкция философских систем Вавилона, Египта, Междуречья, Персии и отчасти Индии затруднена из-за полного отсутствия источниковедческой базы или ее крайней скудности. Уничтожение Александрийской библиотеки, где хранилось более 700 тыс. рукописей, папирусных и пергаментных свитков, собранных на протяжении почти шести столетий со всего Древнего Востока и так называемого Эллинского мира, оказалось невосполнимой потерей для мирового культурного наследия. Сколько веков потребовалось затратить человечеству, чтобы восстановить эти уничтоженные знания.

И последнее. Действительно, философская мысль Древнего Востока носила преимущественно религиозно-мистический и идеологический характер. Иной она быть не могла. Но в то же время, если касаться философии древних Индии и Китая, то они выбрали принципиально иную от греческой, а затем и западноевропейской, парадигму своего развития: не внешний мир, как окружающий человека Космос (Вселенную), а познание внутренней сущности самого мироздания, главным образом через самопознание и самосовершенствование человека. Получается, что на Востоке сложились другие критерии познания, качественно отличные от западноевропейских.

Неслучайно выдающиеся ученые XX столетия нередко призывали обратить внимание на истоки древневосточной мудрости. «Для новых отраслей науки, и, в частности, для наук о природе – представляют большой интерес, – утверждал В.И. Вернадский, – философские концепции Индии» [6]. Обращался к восточным учениям как к аналогам научных идей нашего времени и Нильс Бор [7].

Список литературы

1. Лурье С.Я. Архимед / С.Я. Лурье. – Москва, Ленинград: Изд-во АН СССР, 1945. – С. 13.
2. Ван дер Варден. Пробуждающаяся наука. Математика древнего Египта, Вавилона и Греции / Ван дер Варден. – Москва: ГИМФЛ, 1959. – С. 17–18.
3. Лешкевич Т.Г. Философия науки / Т.Г. Лешкевич. – Москва: ИНФРА-М, 2006. – С. 7–8, 42–47.
4. Казютинский В.В. Концепция глобального эволюционизма в научной картине мира / В.В. Казютинский // О современном статусе идеи глобального эволюционизма. – Москва: ИФ АН СССР, 1986. – С. 70.
5. Степин В.С. Философия науки. Общие проблемы / В.С. Степин. – Москва: Гардарики, 2006. – С. 127.
6. Вернадский В.И. Научная мысль как планетное явление. Философские мысли натуралиста / В.И. Вернадский. – Москва: Наука, 1988. – С. 87.
7. Бор Н. Атомная физика и человеческое познание / Н. Бор. – Москва: Изд-во Иностранной литературы, 1961. – 151 с.
8. Емельянов В.В. Предфилософия Древнего Востока как источник нового философского дискурса / В.В. Емельянов // Вопросы философии. – 2009. – № 9. – С. 153–163.
9. Лебедев С.А. Введение в историю и философию науки / С.А. Лебедев, В.В. Ильин, Ф.В. Лазарев, В.В. Лесков. – Москва: Академический проект, 2005. – С. 10–14.
10. Древние цивилизации Востока. – Москва: Ломоносовъ, 2020. – С. 49, 169–171, 198–199.

References

1. *Lurie S.Ya.* Archimedes. Moscow, Leningrad: Publishing House of the USSR Academy of Sciences; 1945, p. 13 (in Russian).
2. *Van der Waarden.* Awakening science. Mathematics of ancient Egypt, Babylon and Greece. Moscow: GIMFL; 1959, p. 17–18 (in Russian).
3. *Leshkevich T.* Year. Philosophy of Science. Moscow: INFRA-M; 2006, p. 7–8, 42–47 (in Russian).
4. *Kazyutinsky V.V.* The concept of global evolutionism in the scientific picture of the world. On the modern status of the idea of global evolutionism. Moscow: IF of the USSR Academy of Sciences; 1986, p. 70 (in Russian).
5. *Stepin V.S.* Philosophy of Science. Common problems. Moscow: Gardariki; 2006, p. 127 (in Russian).
6. *Vernadsky V.I.* Scientific thought as a planetary phenomenon. Philosophical thoughts of a naturalist. Moscow: Nauka; 1988, p. 87 (in Russian).
7. *Bohr N.* Atomic physics and human cognition. Moscow: Publishing House of Foreign Literature; 1961 (in Russian).
8. *Emelyanov V.V.* Pre-philosophy of the Ancient East as a source of a new philosophical discourse. Questions of philosophy. 2009;9:153–163 (in Russian).
9. *Lebedev S.A., Ilyin V.V., Lazarev F.V., Leskov V.V.* Introduction to the history and philosophy of science. Moscow: Academic Project; 2005, p. 10–14 (in Russian).
10. Ancient civilizations of the East. Moscow: Lomonosov; 2020, p. 49, 169–171, 198–199 (in Russian).

Информация об авторе / Information about the author

Валерий Иванович Никитин, канд. ист. наук, профессор кафедры философии АО «НИЦ «Строительство», Москва

e-mail: kaffcenter@mail.ru

тел.: +7 (499) 170-70-94

Valeriy I. Nikitin, Cand. Sci. (History), Professor of the Philosophy Department, JSC Research Center of Construction, Moscow

e-mail: kaffcenter@mail.ru

tel.: +7 (499) 170-70-94

УДК 624.139

[https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-163-172](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-163-172)

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЕСТЕСТВЕННОГО ОХЛАЖДЕНИЯ ГРУНТОВ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ИХ В ВЕЧНОМЕРЗЛОМ СОСТОЯНИИ

С.А. ПОЛЕЩУК¹✉, канд. эконом. наукВ.В. ГОРУНКОВА¹В.С. ЛАКТИОНОВ²

¹ Заполярный транспортный филиал ПАО ГМК «Норильский никель», ул. Советская, д. 43, г. Дудинка, Красноярский край, 647000, Российская Федерация

² Мурманский транспортный филиал ПАО ГМК «Норильский никель», Портовый пр-д, д. 31, г. Мурманск, 183038, Российская Федерация

Аннотация

Целью данной работы является рассмотрение возможности использования естественного климатического состояния среды для формирования доминантных характеристик влияния геометрической модели построения контуров замерзания техногенного слоя грунтового основания в естественной среде, получаемых в ходе проведения геологических инженерных изысканий, с непосредственным лабораторным анализом проб грунтового основания, в соответствии с глубиной отбора. Исследование актуально в связи с развитием Арктики и наблюдаемым потеплением климата.

Материалы и методы. Основными материалами для статьи стали не только разработки ученых в области инженерной геологии и натурального измерения пространства, но и труды ученых в области философии науки. А также практическое определение взаимосвязи характеристик вариантных параметров термопереноса в грунтовых водах основания для формирования более корректного выбора используемых материалов и технологий в капитальном строительстве.

Результаты. В результате исследования и компьютерного моделирования определен характер движения, образования и принципы воздействия «верховодки» на техногенное грунтовое основание. Также был выявлен основной характерный момент для разработки концепции проектирования и капитального строительства в условиях вечномёрзлых грунтов на основе стабилизации состояний грунтового и техногенного основания и стабильности значимых характеристик естественного состояния грунтов основания.

Выводы. По результатам всего исследования сделан вывод о невозможности использования параметров термостабилизации грунтового основания в подзоне I₁.

Ключевые слова: прочность, устойчивость, деформация, термоперенос, геометрическая составляющая, экспонента значений, долит снежного покрова

Для цитирования: Полещук С.А., Горункова В.В., Лактионов В.С. Использование параметров естественного охлаждения грунтов для стабилизации их в вечномёрзлом состоянии // Вестник НИЦ «Строительство». 2022. Т. 32. № 1. С. 163–172. doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-163-172](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-163-172)

Вклад авторов

Полещук С.А. – разработка концепции, методики и методологии написания статейного материала.

Горункова В.В. – консультирование по вопросам применения методологии рассмотрения с точки зрения философского обоснования.

Лактионов В.С. – моделирование основной концепции написания статейного материала.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

USE OF NATURAL COOLING PARAMETERS FOR STABILIZING SOILS IN THE PERMAFROST STATE

S.A. POLESHCHUK^{1✉}, Cand. Sci. (Economy)

V.V. GORUNKOVA¹

V.S. LAKTIONOV²

¹ Polar Transport Branch of PJSC MMC "NORILSK NICKEL", Sovetskaya str., 43, Dudinka, Krasnoyarsk region, 647000, Russian Federation

² Murmansk Transport Branch of PJSC MMC "NORILSK NICKEL", Portovyi lane, 31, Murmansk, 183038, Russian Federation

Abstract

Aim. This study aims to use natural weather conditions of the environment, caused by forming the dominant characteristics of the geometric model associated with freezing profiles of the industrial soil foundation in the natural surroundings. These profiles were obtained during soil investigations, followed by a direct laboratory analysis of soil samples, depending on the sampling depth. The relevance of the research is determined by Arctic development and climate change.

Materials and methods. The work is based on the results obtained in fields of not only geological engineering and natural spatial measurements, but also the philosophy of science. The relationship between the characteristics of varying parameters of heat transfer in foundation subsoil waters was empirically determined to ensure an optimal selection of materials and technologies employed in construction.

Results. The conducted study and computer modeling determined the nature of motion, formation, and impact of near-surface water on industrial soil foundations. Based on the stabilization of soil and industrial foundation states and the stability of essential characteristics associated with their natural state, the key aspect for developing the concept of design and construction under the conditions of permafrost soil was identified.

Conclusions. It is established that the parameters of thermal stabilization of soil foundations are inapplicable in subzone I₁.

Keywords: strength, stability, deformation, heat transfer, geometric component, exponent of value, snow dolith

For citation: Poleshchuk S.A., Gorunkova V.V., Laktionov V.S. Use of natural cooling parameters for stabilizing soils in the permafrost state. Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022. Vol. 32. No. 1. P. 163–172 (In Russ.). doi: [https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1\(32\)-163-172](https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-1(32)-163-172)

Author contribution statements

Poleshchuk S.A. – concept development, writing manuscript.

Gorunkova V.V. – advising on the methodology based on philosophical reasoning.

Laktionov V.S. – concept development.

Funding

No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest

The authors declare no conflict of interest.

Прочность, устойчивость и нормальная эксплуатация зданий и сооружений определяется не только конструктивными особенностями используемых конструкций и материалов, но и состоянием, свойствами грунтов, на которых они монтируются. Здесь необходимо учитывать воздействие не только внутренних нагрузок (непосредственный вес конструкции), но и внешних (вес, давление и «поведение» грунтового пространства). Если конструктивные сооружения подготавливаются в соответствии с технологией, с заданными свойствами, то грунтовое пространство имеет самостоятельную, трудно объяснимую историю образования.

Таким образом, в рамках проектирования новых конструкций и поддержания старых в работоспособном состоянии необходимо руководствоваться основными свойствами поведения грунтов под нагрузками. Прочность грунта во много раз меньше, а деформируемость, сопровождаемая наличием многих факторов, намного выше. Стоит заметить, что возрастание и несоответствие нагрузок строительных конструкций с плотностью грунта может приводить к недоиспользованию конструктивных особенностей принимаемых материалов, что в свою очередь, приводит к нарушению несущей способности грунтового основания. Таким образом, грунты, залегающие непосредственно вблизи земной поверхности, подвержены климатическим, метеорологическим и другим воздействиям, управление которыми невозможно, и, соответственно, они не могут служить надежным основанием, поэтому часть сооружений непосредственно заглубляется ниже поверхности земли. Подземная часть сооружения – фундамент, предназначена прежде всего для распределения нагрузки от строения на основание.

В настоящей работе предлагаем рассматривать грунт как среду, вмещающую в себя инженерные сооружения, и принимать не только воздействие сооружения на грунт, но и грунта на сооружение. Таким образом, грунт будем рассматривать как основание сооружения, включенное в имеющуюся среду с физическими и механическими свойствами. Не стоит забывать, что сооружение и основание составляют единую систему. Свойства грунтов основания, их поведение под нагрузкой от сооружения во многом определяет прочность, устойчивость и нормальную эксплуатацию возведенных конструкций.

Закономерности состава и строения грунтов тесно связаны с условиями их происхождения. Согласно ГОСТ 25100-2011 «Грунты. Классификация» (от 01.01.2013 г.) грунты классифицируются по основным классам: скальные (грунты с жесткими кристаллическими, цементационными связями); дисперсные (грунты с физико-химическими (водоколлоидными), физическими и механическими структурными связями); мерзлые (грунты с криогенными связями). Стоит отметить, что криогенные связи характеризуются прежде всего кристаллизационными связями, которые возникают во влажных трещиноватых и дисперсных скальных грунтах при наличии отрицательных температур, обеспечивающих сцементирование льдом.

В процессах цементирования грунтового основания необходимо руководствоваться ведомственными нормами распределения грунтов Российской Федерации на Восточно-Сибирском направлении (рис. 1), которые выделяют три основные подзоны распространения мерзлых грунтов. Подзоны характеризуются наличием техногенного слоя, который как замерзает в холодное время года, так и оттаивает (насыщение подземными водами).

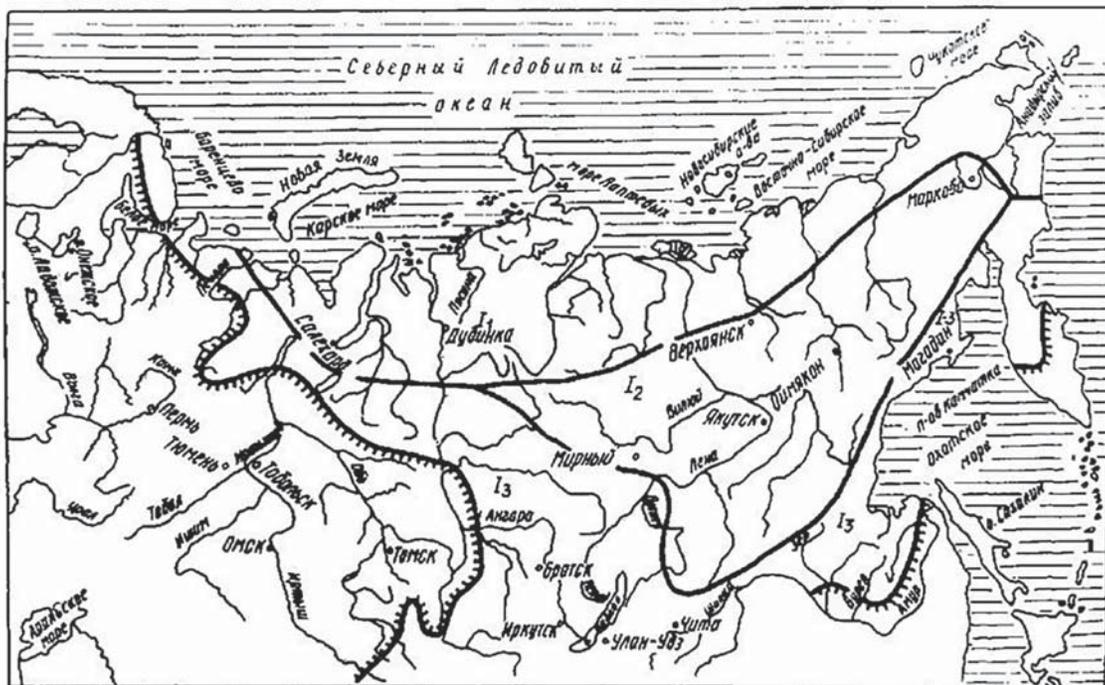


Рис. 1. Схематическая карта подзон распространения мерзлых грунтов:

- I_1 – северная подзона, характеризующаяся наличием низкотемпературных грунтов сплошного распространения;
- I_2 – центральная подзона, характеризующаяся распространением мерзлых грунтов;
- I_3 – южная подзона высокотемпературных грунтов островного и частичного распространения

Fig. 1. Schematic map of sub-zones of frozen ground distribution:

- I_1 – northern subzone characterized by continuous low-temperature soil;
- I_2 – central subzone characterized by frozen soil distribution;
- I_3 – southern subzone of insular and partial high-temperature soils

В настоящее время остро возникает вопрос о проявлении физических параметров растепления грунтового основания и появления мест накопления таликовых отложений*. При этом мы можем говорить, что это наше обычное физическое представление, не меняющееся в конкретном отношении, может быть ошибочным. Когда мы начинаем анализировать принципы появления, либо изменения физического состояния грунтового покрытия, мы берем к рассмотрению только сложившееся миропонимание о времени в аспектах чрезвычайно характера изменения, но здесь необходимо рассматривать приобретаемый во времени аспект явления, которое может легко идти вперед и назад, то есть является процессом обратимым во времени. Для анализа характеристик таких процессов необходимо рассматривать основные составляющие энтропии распределения энергии в структуре грунтового основания и техногенных слоев выравнивания. Таким образом, мы с уверенностью можем говорить, что растепление грунтового основания происходит с учетом временных периодов, руководствуясь принципом Карно: «...в любом природном явлении никогда не будет идти

* Таликовые отложения – обводненные грунтовые залежи, чаще всего место сбора сезонных «верховодок».

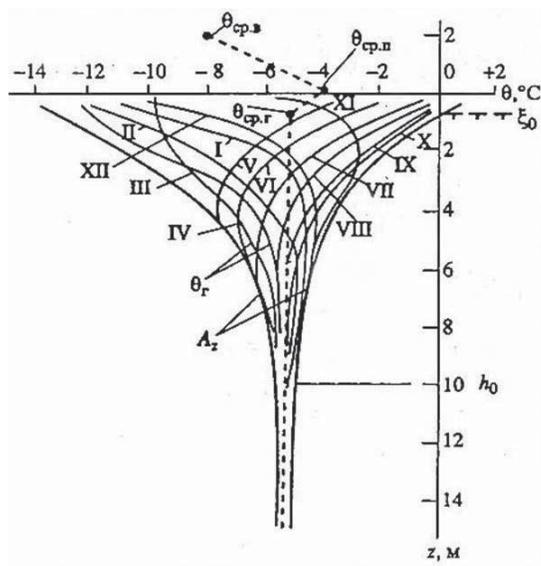


Рис. 3. Рекомендуемое температурное распределение в I₁ подзоне
Fig. 3. Recommended temperature distribution in I₁ subzone

Основные преобладающие волнообразные явления в рассматриваемых участках характеризуются понятиями мощности основания с учетом влияния техногенной насыпи. Введение основных параметров идентификации с параметрами мощности отмечается выявлением особого строения грунтового покрытия, определяющего его неоднородность с параметрами анизотропности. На границах неоднородной среды в самых разнообразных ее проявлениях появляются различные условия, в основном отвечающими за водонакопление и водопереподачу.

Соответственно, если мы отмечаем возможность появления неоднородной среды, то основным источником является вода, образующаяся, в основном, за счет таяния замёрзших техногенных оснований. Появление воды, как правило, ведет к сокращению основных параметров мощности слоев грунтового основания.

Таким образом, на участках проводились термометрические замеры, которые выполнялись на основе выделенных трасс и глубин, полностью удовлетворяющих требованиям СП 47.13330.2016 «Инженерные изыскания для строительства».

Не стоит забывать, что рассматриваемый нами участок отнесен к I₁ подзоне, в которая отмечается постоянным распределением температуры, можно представить только в виде параболы распределения температур замёрзания и оттаивания (рис. 3).

Таким образом, рассматривая грунты, мы можем заявлять, что сам принцип оттаивания присущ только техногенным (насыпным) грунтам, а понятие анизотропности проникает глубже в состояние грунтового пространства. При этом логично утверждать, что полностью выдерживается однородность и мощность пространства с вариантно-стью рассмотрения. В геометрическом восприятии можно характеризовать параметры выраженной однородности основания. Опираясь на разработки Уильяма Клиффорда, признавая реальное существование «многомерзлого»** пространства, можно говорить о трехмерном геометрическом пространстве, тождественным со структурой вещества, его заполняющим.

Таким образом, пренебрегая трехмерным геометрическим пространством, мы будем рассматривать четырехмерное пространство, характеризуемое только техногенными (насыпными) грунтами. На рассматриваемом участке техногенный слой представлен, в основном, аллювиально-озерными отложениями. Рассматривать грунтовые отложения как неподвижные

** Грунтовое основание можем рассматривать только как основание многомерзлого пространства, т. к. при более низком погружении в грунт характеристики грунтов значительно изменяются. Многомерзлое основание рассматривается как субстанция с более выраженными сцементированными свойствами грунтового основания.

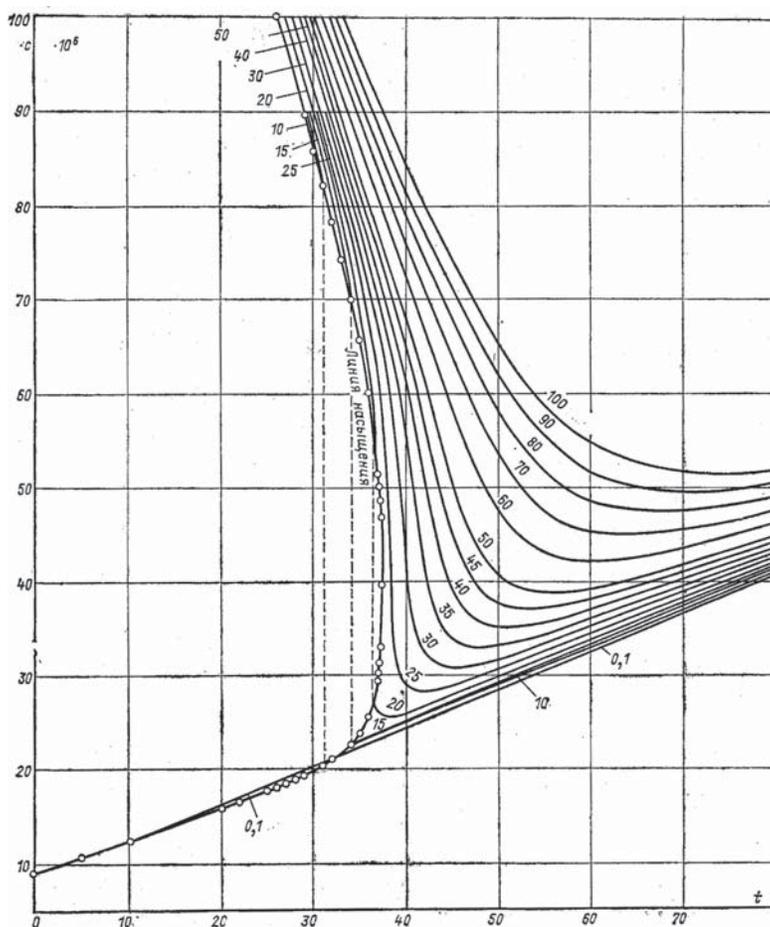


Рис. 4. Энтропия процесса заморзания техногенного (насыпного) грунта

Fig. 4. Entropy of industrial (filled) soil freezing

статические в равновесии можно только в их устойчивом предельном состоянии, т. е. в зимний период времени (когда температура окружающего воздуха долгое время держится ниже нуля). Таким образом, рассматривая и определяясь с геометрическим пространством рассмотрения грунтового основания, будем руководствоваться основными принципами в динамике образования, определенными Сади Карно (1824 г.), который положил начало анализу процессов теплопереноса разукрупненных частиц, предложив рассматривать явление на основе геометрически полярного вектора. С уверенностью можем говорить, что на основе принятия геометрической модели с алгебраическим обобщением, в характеристиках грунтов присутствует ярко выраженная неоднородность в равновесиях появления с динамическими направлениями.

На рис. 4 отчетливо представлена геометрическая модель естественного промерзания грунтового основания, на основе направления распределения полярного вектора однозначным с временем энтропии.

При рассмотрении геометрической модели появляется воздействие характера энантиоморфности распределения слоя промерзания и оттаивания, так называемое деление

вектральных составляющих на правое и левое. В точках деления определяются более разуплотненные и обводненные грунты (подтверждается данными георадиолокационного зондирования). Соответственно, с уверенностью можем назвать зоны стока и направления движения основных масс грунтовых вод в периоды оттаивания и деградации условий вечной мерзлоты. Но, как показано выше, при построении четырехмерного геометрического пространства можно выделить и рассчитать плотность и емкость образуемых грунтовых вод и направление течения. А с применением алгебраических расчетных методов, выделяются параметры пределов величин (lim), рассчитанных на параметрах экспонентов значений (exp).

При выделении параметров мы определяем максимально возможное проникновение грунтовых вод в существующие направления течения и сбора, при этом параметры сбора образуются только долитами*** снежного покрова, что в основном обуславливается рельефностью местности. Таким образом, с уверенностью можно говорить, что участки сбора возможно ликвидировать естественным способом (организацией доступа холодного воздуха). На основании рис. 4 видно естественное промерзание грунтового покрытия, происходящее на основе появления кристаллических свойств морфологических проявлений в основном составе грунтового основания.

В I_1 подзоне применение различных методов активной термостабилизации грунтового основания крайне нежелательно, так как это приводит к разлому четырехмерного геометрического пространства, пренебрежению пределов образования и самоликвидации долитов техногенного грунта, пучению грунтового основания. На основании геологических изысканий техногенный грунт рассматриваемого участка стабилен, обводнен только в параметрах расчетной экспоненты значений.

Список литературы

1. Розенберг И.Н. Решение задач размещения с нечеткими данными с использованием геоинформационных систем / И.Н. Розенберг, Т.А. Старостина. – Москва: Научный мир, 2016. – 218 с.
2. Цветков В.Я. Серый реляционный анализ / В.Я. Цветков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2018. – № 12-1. – С. 166.
3. Цветков В.Я. Информационный подход / В.Я. Цветков // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2016. – № 4-3. – С. 645.
4. Цветков В.Я. Ситуационное моделирование в строительстве / В.Я. Цветков // Информационные технологии. – 2018. – № 4. – С. 69–74.
5. Savinykh V.P. Geodata As a Systemic Information Resource / V.P. Savinykh, V.Ya. Tsvetkov // Herald of the Russian Academy of Sciences. – 2014. – Vol. 84, no. 5. – P. 365–368. <https://doi.org/10.1134/s1019331614050049>
6. Механика грунтов, основания и фундамента / С.Б. Ухов, В.В. Семенов, В.В. Знаменский [и др.]. – М.: Высшая школа, 2004. – 566 с.
7. Полещук С.А. Эффективность системного подхода (строительство) / С.А. Полещук. – Волгоград: Волгоградское науч. изд-во, 2010. – 252 с.
8. ГОСТ 30416 – 2012. Грунты. Лабораторные испытания. Общие положения. – Введ. 01.07.2013. – М.: Стандартинформ, 2013. – 12 с.

*** Долит – грунтовая прослойка между вечномерзлыми и насыпными (техногенными) грунтами. Техногенные грунты образуются в связи с ветряными воздействиями или в процессе хозяйственной деятельности человека.

9. Тенирядко Н.И. Механика грунтов: методические указания к решению задач и обработке результатов лабораторных работ всех форм обучения и всех специальностей направления «Строительство» / Н.И. Тенирядко, Н.Ф. Пыхтеева. – Екатеринбург: УрФУ, 2009. – 28 с.
10. Tsvetkov V.Ya. Information Relations / V.Ya. Tsvetkov // Modeling of Artificial Intelligence. – 2015. – Vol. 8, no. 4. – P. 252–260.
11. Поспелов Д.А. Ситуационное управление: Теория и практика / Д.А. Поспелов. – Москва: Наука, 1986. – 284 с.

References

1. Rosenberg I.N., Starostina T.A. Solving placement problems with fuzzy data using geoinformation systems. Moscow: Nauchnyi mir Publ.; 2016. 218 p. (in Russian).
2. Tsvetkov V.Ya. Gray relational analysis. Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2018;(12–1):166 (in Russian).
3. Tsvetkov V.Ya. Informational approach. Mezhdunarodnyi zhurnal prikladnykh i fundamental'nykh issledovaniy [International Journal of Applied and Fundamental Research]. 2016;(4–3):645 (in Russian).
4. Tsvetkov V.Ya. Situational modeling in construction. Informatsionnye tekhnologii = Information technologies. 2018;(4):69–74 (in Russian).
5. Savinykh V.P., Tsvetkov V.Ya. Geodata As a Systemic Information Resource. Herald of the Russian Academy of Sciences. 2014;84(5):365–368. <https://doi.org/10.1134/s1019331614050049>
6. Ukhov S.B., Semenov V.V., Znamenskiy V.V., Ter-Martirosyan Z.G., Chernyshev S.N. Soil mechanics, foundations and Foundation. Moscow: Vysshaya shkola Publ.; 2004. 566 p. (in Russian).
7. Poleshchuk S.A. Effectiveness of the system approach (construction). Volgograd: Volgograd scientific publishing house; 2010. 252 p. (in Russian).
8. State Standard 30416-2012. Soils. Laboratory tests. General provisions. Moscow: Standartinform; 2013. 12 p. (in Russian).
9. Teniryadko N.I., Pykhteeva N.F. Soil mechanics: methodological guidelines for solving problems and processing the results of laboratory work of all forms of training and all specialties of the “Construction” direction. Ekaterinburg: UrFU; 2009. 28 p. (in Russian).
10. Tsvetkov V.Ya. Information Relations. Modeling of Artificial Intelligence. 2015;8(4):252–260.
11. Pospelov D.A. Situational Management: Theory and Practice. Moscow: Nauka Publ.; 1986. 284 p. (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Сергей Александрович Полящук , канд. эконом. наук, главный менеджер Проектного офиса Заполярного транспортного филиала ПАО ГМК «Норильский никель», Дудинка
тел.: +7 (958) 150-13-54

Sergey A. Poleshchuk , Cand. Sci. (Econ.), Chief Manager of the Project Office of the Polar Transport Branch of PJSC MMC “NORILSK NICKEL”, Dudinka
tel.: +7 (958) 150-13-54

Валентина Владимировна Горункова, организатор делового администрирования (MBA), заместитель директора по управлению проектными инвестициями – начальник Проектного офиса Заполярного транспортного филиала ПАО ГМК «Норильский никель», Дудинка
тел.: +7 (913) 530-09-42

Valentina V. Gorunkova, Master of business administration (MBA), Deputy Director, Project Investment Management, Head of the Project Office of the Polar Transport Branch of PJSC MMC “NORILSK NICKEL”, Dudinka
tel.: +7 (913) 530-09-42

Вадим Сергеевич Лактионов, мастер делового администрирования (МВА), заместитель директора – Руководитель судоходного подразделения Мурманского транспортного филиала ПАО ГМК «Норильский никель», Мурманск
тел.: +7 (921) 951-88-95

Vadim S. Laktionov, Master of Business Administration (MBA), Deputy Director, Head of the Shipping Division of Murmansk Transport Branch of PJSC MMC “NORILSK NICKEL”
tel.: +7 (921) 951-88-95

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

1

АО «НИЦ «Строительство» проводит подготовку специалистов на курсах повышения квалификации по очной и заочной формам:

- разработка индивидуальных программ обучения и учебно-тематических планов
- по уникальным программам АО «НИЦ «Строительство»
- в области инженерных изысканий
- в области проектирования
- в области строительства



2

Преподавательский состав
Учебного центра

- Лекции читают академики, действующие члены и члены-корреспонденты РААСН, лауреаты Премий Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники РФ, доктора и кандидаты технических наук
- Учебный класс рассчитан на обучение до 75 человек одновременно. Оснащен системой кондиционирования и видеонаблюдения

3

Набор в аспирантуру и докторантуру АО «НИЦ «Строительство» проводится по направлению 08.06.01 «Техника и технологии строительства» по направленностям:

- 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 05.23.05 «Строительные материалы и изделия»

4

В АО «НИЦ «Строительство» работает совет по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. Защита диссертаций проводится по следующим научным специальностям:

- 05.23.01 «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 05.23.02 «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 05.23.05 «Строительные материалы и изделия»



г. Москва,
2-я Институтская ул., д. 6



+7(499) 174-73-84
+7(499) 174-73-80



motorina@cstroy.ru
smirnova@cstroy.ru
cool.opk2012@yandex.ru



www.cstroy.ru

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

Приглашает вас:

- Повысить квалификацию специалистов и экспертов
- Пройти обучение в аспирантуре
- Подготовить диссертацию
- Защитить диссертацию на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр



ЦНИИСК
ИМ.В.А.КУЧЕРЕНКО



НИИЖБ
ИМ.А.А.ГВОЗДЕВА



НИИОСП
ИМ.Н.М.ПЕРСЯНОВА



ОБУЧЕНИЕ В АСПИРАНТУРЕ АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО» ПРОВОДИТСЯ ПО СЛЕДУЮЩИМ ФОРМАМ ОБУЧЕНИЯ:

очная

прикрепление лиц
для подготовки
диссертации
на соискание
ученой степени
кандидата наук *

заочная

* без освоения программ подготовки научно-педагогических кадров в аспирантуре

100+

TECHNO BUILD

IX Международный
строительный форум
и выставка

forum-100.ru

18-21 октября 2022
Екатеринбург



стать экспонентом

13 000
посетителей

235
экспонентов

500
спикеров

120
секций

25
стран

*показатели 2021 года

*В связи с внесением некоторых изменений в графическую часть статьи «Трещи-
нотойкость каменных стен», авторы Ищук М.К., Айзятуллин Х.А., опубликованной
в номере 4(31)2021 журнала «Вестник НИЦ «Строительство», актуальную редакцию
смотреть на сайте журнала <https://vestnik.cstroy.ru/jour/article/view/164>*

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»
Вып. 1(32) 2022

Фото обложки: главный корпус АО «НИЦ «Строительство»

Редактор выпуска Починина Н.Е.
Компьютерная верстка Чорненький С.И.

Дата выхода в свет: 25.03.2022 г. Формат 70×100/16
Бумага мелованная. Офсетная печать.
Тираж 500 экз. Заказ № 1512

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



НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ISSN: 2224-9494 (Print)
ISSN: 2782-3938 (Online)
Подписной индекс: 36569
АО «НИЦ «Строительство»
Москва, 2022