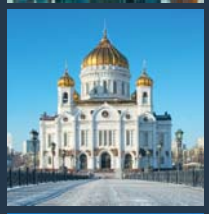
ISSN 2224-9494 (Print)
ISSN 2782-3938 (Online)

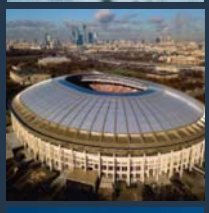
№ 3(38) 2023

НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко | НИИЖБ им. А.А. Гвоздева | НИИОСП им. Н.М. Герсеванова

ВЕСТНИК
НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»





НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ВЕСТНИК
НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

№ 3(38) 2023

НАУЧНЫЙ ПОТЕНЦИАЛ СТРОИТЕЛЬНОЙ ОТРАСЛИ

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

Вестник НИЦ «Строительство» включен в перечень ВАК с 03.10.2019 г. по научным специальностям:
2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения;
2.1.2 – Основания и фундаменты, подземные сооружения;
2.1.5 – Строительные материалы и изделия.

Учредитель и издатель: АО «НИЦ «Строительство»

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

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

RESEARCH CENTER
OF CONSTRUCTION
Joint Stock Company

BULLETIN

of Science and Research Center
of Construction

No. 3(38) 2023

SCIENTIFIC POTENTIAL OF THE CONSTRUCTION INDUSTRY

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

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

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

Founder and publisher: JSC Research Center of Construction

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

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

Редакционная коллегия

УДК 69; 624; 55; 550.34; 531.01; 531.03

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

Научный редактор
СМИРНОВА Любовь Николаевна, канд. техн. наук

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

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

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

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

ГУСЕВ Борис Владимирович, д-р техн. наук, профессор,
президент Российской инженерной академии (РИА),
президент Международной инженерной академии
(МИА), член-корреспондент РАН,
Москва, Российская Федерация

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Вестник НИЦ «Строительство»
Научный потенциал строительной отрасли
Вып. 3(38) / под ред. А.И. Звездова. –
М.: АО «НИЦ «Строительство», 2023. – 172 с.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI журнала: https://doi.org/10.37538/2224-9494
DOI выпуска: https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)
В действующем Перечне ВАК от 17.07.2023 г.
под номером 576.

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

ISSN 2224-9494 (Print)
ISSN 2782-3938 (Online)
© АО «НИЦ «Строительство»,
«Вестник НИЦ «Строительство», 2023

EDITORIAL BOARD

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

Editor in Chief
ZVEZDOV Andrey I., Dr. Sci. (Engineering), Professor

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

OBOZOV Vladimir I., Dr. Sci. (Engineering), Professor
Research Institute of Building Constructions (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

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 of NAN RA, Professor
National University of Architecture and Construction
of Armenia, Yerevan, Republic of Armenia

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

Bulletin of Science and Research Center of Construction
Scientific potential of the construction industry
Issue 3(38) / edited by A.I. Zvezdov. –
M.: JSC Research Center of Construction, 2023. – 172 p.
ISSN 2224-9494 (Print) ISSN 2782-3938 (Online)
DOI journal https://doi.org/10.37538/2224-9494
DOI issue https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)
In the current version of List of HAC from July 17, 2023 our journal has a number 576.

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 El No. FS77-82129 dated October 18, 2021.
Publishes research articles on current problems and prospects of construction science, directly related to the solution of practical tasks. For scientists, engineers, teachers, postgraduate students.

ISSN 2224-9494 (Print)
ISSN 2782-3938 (Online)
© JSC Research Center of Construction, Bulletin of Science and Research Center of Construction, 2023

Содержание

Строительные конструкции, здания и сооружения

Кривцов Ю.В., Ладыгина И.Р., Комарова М.А., Хайдаров А.У., Еремина Г.П., Грошев Ю.М.
Оценка совместимости огнезащитных составов по металлу с грунтовочными покрытиями для достижения максимальной эффективности средств огнезащиты 7

Лебедева И.В., Петрова Т.А.
Анализ современных подходов к оценке надежности в строительстве 20

Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А.
Некоторые соображения о построении современной теории расчета железобетонных конструкций (продолжение) 37

Пономарев О.И., Минасян А.А., Забегин М.А.
Особенности мониторинга технического состояния несущих конструкций стадиона «Лужники» при реконструкции 46

Сагайдак А.И.
Технологии мониторинга бетонных и железобетонных конструкций методом акустической эмиссии 62

Фарфель М.И.
История создания и реконструкций Большой спортивной арены стадиона «Лужники» 82

Основания и фундаменты, подземные сооружения

Марков М.В., Артемов А.Р., Вдовенко А.И.
Применение геодезических методов для предупреждения возникновения аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений 106

Строительные материалы и изделия

Розенталь Н.К., Чехний Г.В.
Анализ методов определения морозостойкости бетона 128

Управление жизненным циклом объектов строительства

Низомов Д.Н., Сангинов А.М.
Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с фрикционно-маятниковыми опорами 143

Строительная механика

Чернов Ю.Т.
Интегральные уравнения второго рода в задачах расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы при произвольных динамических воздействиях и характере физических зависимостей 155

Contents

Building constructions, buildings and structures

Krivtsov Yu.V., Ladygina I.R., Komarova M.A., Khaydarov A.U., Eremina G.P., Groshev Yu.M.
Assessment of compatibility of metal fire-proof compositions with primer coatings to maximize effectiveness of flame retardants 7

Lebedeva I.V., Petrova T.A.
Analysis of modern approaches to assessing reliability in construction 20

Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A.
Calculation of reinforced concrete structures: considerations on developing new theory (continued) 37

Ponomarev O.I., Minasyan A.A., Zabegin M.A.
Monitoring the technical state of load-bearing structures of the Luzhniki Stadium during reconstruction 46

Sagaidak A.I.
Technologies for acoustic emission monitoring of concrete and reinforced concrete structures 62

Farfel M.I.
History of creation and reconstruction of the Grand Sports Arena of the Luzhniki stadium 82

Foundations, underground structures

Markov M.V., Artemov A.R., Vdovenko A.I.
Application of geodetic methods for preventing emergencies in the construction and operation of buildings and structures 106

Building materials and products

Rozental N.K., Chekhnii G.V.
Analysis of test methods for frost resistance of concrete 128

Lifecycle management of construction projects

Nizomov D.N., Sanginov A.M.
Numerical simulation of seismically isolated buildings with friction pendulum bearings..... 143

Structural mechanics

Chernov Yu.T.
Integral equations of the second kind in dynamic analysis of nonlinear systems with a finite number of degrees of freedom under arbitrary dynamic loading and material dependencies 155

УДК 699.941, 624.07, 699.81
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-7-19 EDN: ABSXUU

ОЦЕНКА СОВМЕСТИМОСТИ ОГНЕЗАЩИТНЫХ СОСТАВОВ ПО МЕТАЛЛУ С ГРУНТОВОЧНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ СРЕДСТВ ОГНЕЗАЩИТЫ

Ю.В. КРИВЦОВ, д-р техн. наук
И.Р. ЛАДЫГИНА, канд. техн. наук
М.А. КОМАРОВА, канд. хим. наук
А.У. ХАЙДАРОВ
Г.П. ЕРЕМИНА
Ю.М. ГРОШЕВ✉, канд. техн. наук

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

Аннотация

Введение. В данной статье рассмотрены вопросы планирования работ по огнезащите металлоконструкций, в том числе необходимость правильного выбора грунтовочного покрытия, что позволит избежать проблем в будущем, сэкономить время и средства, а примененное огнезащитное покрытие будет сохранять прочность на долгие годы. Показано, что для максимальной эффективности применения огнезащитных материалов необходимо уделять должное внимание совместимости материалов при создании проектов и технологии нанесения покрытий.

Цель работы – установление актуальных требований к содержанию и последовательности проведения работ по оценке совместимости огнезащитных составов с примененной грунтовкой металлических конструкций.

Материалы и методы. Проведена оценка совместимости огнезащитных материалов с грунтовками с помощью сертифицированного и поверенного лабораторного оборудования. Приведено описание современного лабораторного комплекса для проведения испытаний.

Результаты. Приведены результаты работ по проверке совместимости огнезащитных материалов с грунтовками. Комплексное покрытие должно оцениваться на наличие или отсутствие дефектов, на его критичность при последующей эксплуатации, также определяется степень адгезии между слоями лакокрасочной системы и оценивается способность покрытия сопротивляться влиянию неблагоприятных факторов окружающей среды. На основании полученной информации даются рекомендации о допустимости совместного использования тех или иных лакокрасочных материалов.

Выводы. Обосновано, что для максимальной эффективности применения огнезащитных материалов и достижения главной цели – длительной огнестойкости конструкций – необходимо уделять особое внимание совместимости материалов при создании проектов и технологии нанесения покрытий.

Ключевые слова: совместимость огнезащитных составов, огнезащитное покрытие, огнезащитная эффективность покрытия, грунтовка металлоконструкций

Для цитирования: Кривцов Ю.В., Ладыгина И.Р., Комарова М.А., Хайдаров А.У., Еремина Г.П., Грошев Ю.М. Оценка совместимости огнезащитных составов по металлу с грунтовочными покрытиями для достижения

максимальной эффективности средств огнезащиты. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3);7–19. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-7-19

Вклад авторов
Все авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование
Исследование выполнялось за счет средств ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство».

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 30.06.2023
Поступила после рецензирования 26.07.2023
Принята к публикации 01.08.2023

ASSESSMENT OF COMPATIBILITY OF METAL FIRE-PROOF COMPOSITIONS WITH PRIMER COATINGS TO MAXIMIZE EFFECTIVENESS OF FLAME RETARDANTS

Yu.V. KRIVTSOV, Dr. Sci. (Engineering)
I.R. LADYGINA, Cand. Sci. (Engineering)
M.A. KOMAROVA, Cand. Sci. (Chem.)
A.U. KHAYDAROV
G.P. EREMINA
Yu.M. GROSHEV✉, Cand. Sci. (Engineering)

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 present paper considers the issues of work planning for fire protection of steel structures, including the correct selection of primer coating in order to avoid potential problems, to save time and budget, as well as to ensure long-term durability of the structures due to the applied fire protection coating. The compatibility of materials appears to be essential when creating projects and coating technology to maximize the effectiveness of fire-proof materials.

Aim. To establish the relevant requirements for the scope and sequence of work in assessing the compatibility of fire-proof compositions with the applied primer of steel structures.

Materials and methods. The compatibility of flame retardants with primers was assessed using certified and verified laboratory equipment. The paper describes a modern laboratory facility for testing.

Results. The results of testing compatibility of flame retardants with primers are presented. The coating system should be evaluated for the defects, its criticality in the subsequent operation, the degree of coating interlayer adhesion, and the ability of the coating to resist adverse environmental effects. Following the obtained information, recommendations are given on the compatibility of certain coating materials.

Conclusion. The study demonstrated the significance of material compatibility when creating projects and coating application technology to ensure maximum effectiveness of flame retardants and to tackle the crucial task — providing long-term fire resistance of structures.

Keywords: compatibility of fire-proof compositions, flame-retardant coating, flame-retardant efficiency of the coating, primer for steel structures

For citation: Krivtsov Yu.V., Ladygina I.R., Komarova M.A., Khaydarov A.U., Eremina G.P., Groshev Yu.M. Assessment of compatibility of metal fire-proof compositions with primer coatings to maximize effectiveness of flame retardants. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):7–19. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-7-19

Author contribution statements
All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding
The research was supported by TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 30.06.2023
Revised 26.07.2023
Accepted 01.08.2023

Введение

Вопросам устройства огнезащиты с помощью огнезащитных красок, лаков и обмазок в настоящее время уделяется большое внимание. Методика устройства огнезащиты, несмотря на простоту и высокую технологичность, имеет свои особенности, которые необходимо учитывать. Это поможет не допустить снижения качества огнезащитного покрытия и разрушения огнезащитного покрытия в процессе эксплуатации.

Стоит обратить внимание на то, что подготовку поверхностей защищаемых конструкций следует проводить в соответствии с ГОСТ. Чтобы осуществлять устройство огнезащиты, специалисты обязаны пройти обучение по использованию огнезащитных материалов.

Четкое планирование работ по огнезащите металлоконструкций и правильный выбор грунтовочного покрытия сэкономят временные и денежные затраты, а использованное огнезащитное покрытие сохранит свою эффективность на протяжении многих лет. Особенно важно правильно выбрать грунтовку, учитывая, что ее тип должен соответствовать условиям применения, типу огнезащитной краски, а также металлу, на который она будет наноситься.

Грунтовка по металлу

Известно, что грунтовка по металлу является необходимым этапом работ по огнезащите металлоконструкций. Перед нанесением огнезащитной краски на поверхность металлоконструкции в обязательном порядке необходимо провести определенные подготовительные работы, в первую очередь – нанесение грунтовки. Это позволит облегчить нанесение огнезащитной краски на поверхность металлоконструкции и повысить качество и долговечность огнезащитного покрытия.

Самыми распространенными грунтовками являются:

Алкидная. Основа – алкидные лаки, содержащие стабилизаторы и присадки. Имеют двойную защиту (наружную и внутреннюю) и быстро сохнут.

Ортофосфорная. Основа – кислота. Используется по покрытиям с ржавчиной, обеспечивает защиту металла и восстанавливает поверхность (преобразовывает окислы в неагрессивный продукт).

Акриловая вододисперсионная. Может использоваться без дальнейшего покрытия финишным слоем краски (если состав краски кислотный) или как быстросохнущая основа для лакокрасочных материалов.

Эпоксидная. Применяется для конструкций, используемых в условиях повышенной влажности. Эпоксидные грунтовки по металлу отличаются большим уровнем защиты от влажности и прочих атмосферных воздействий [1].

Особенности грунтовки металлоконструкций при выполнении огнезащиты

Основные виды грунтовок по металлу:

– *изолирующая* – оптимальный вид грунтовки для применения на черных металлах. При ее применении не допускается попадание на покрытие влаги и воздуха за счет специальных веществ, которые в свою очередь образуют защитный слой-пленку на поверхности. Чаще всего в изолирующую грунтовку входят цинковые белила и железный сурик;

– *ингибирующая* грунтовка – наиболее распространенный вид. Содержит в составе вещества, замедляющие процесс коррозии. Важно, что металл в данном случае получает дополнительный защитный слой – грунт-эмаль. Можно применять и для защиты металлоконструкций, эксплуатируемых в агрессивной среде;

– *пассивирующая* грунтовка содержит в своем составе специальные пигменты, которые начинают частично растворяться, взаимодействуя с водой, образовывая при этом защитную оксидную пленку. Эта пленка предохраняет металл от коррозии. Данный процесс называется пассивированием (или пассивацией) металла, при котором снижается электрохимическая активность поверхности;

– *фосфатирующая* грунтовка применяется при нанесении на цветные металлы в случаях, когда огнезащитное покрытие контактирует с влагой (присутствует повышенный риск возникновения коррозии). Содержит ортофосфорную кислоту, вызывающую процесс фосфатирования, который улучшает взаимодействие огнезащитной краски с поверхностью;

– *протекторная* грунтовка используется для покрытия стальных изделий, которые подвержены контакту с водой (например, погружаемых в водоемы). В состав, как правило, входят такие металлические пигменты, как цинк, свинец, магний;

– *преобразователи ржавчины.* В составе этой грунтовки содержится ортофосфорная кислота, помогающая в борьбе с ржавчиной уже после ее появления, при этом превращая образовавшийся налет в фосфаты железа.

Особое внимание стоит уделить подготовке поверхности металлоконструкций к нанесению выбранного вида грунтовки. Необходимо снять старую огнезащитную краску, окалину и ржавчину, после чего очистить поверхность металлической конструкции от пыли и загрязнений, а также обезжирить ее растворителем.

Нанесение грунтовки на поверхность металлоконструкции может осуществляться любым удобным способом – валиком, кистью или методом безвоздушного распыления. Высушивание обработанной грунтовкой металлической поверхности перед нанесением огнезащитной краски является обязательным этапом подготовки.

Описание лабораторного комплекса для исследований ЛКП в соответствии с отечественными и международными стандартами (ГОСТ, ISO)

1. Применяемые инструменты и оборудование:

– оценка внешнего вида покрытий (ГОСТ 9.407-2015 [2], ГОСТ 25706-83 [3], ГОСТ 7048-81 [4]) – бинокль, монокль лупы (с 5–10-кратным увеличением); инспекционные поворотные зеркала;

– измерение толщины покрытий к металлическим основаниям (ГОСТ 31993-2013 [5]) – магнитный толщиномер покрытий типа Salu Tron D4/D5;

– измерение температуры и влажности воздуха – термометр ртутный (от –50 до +50 °С);

– измерение глубины, ширины и длины трещин, зазоров (ГОСТ 166-89 [6], ТУ 3936-214-54769955-2008 [7]) – штангенциркуль ШЦ-1 с ценой деления не менее 0,1 мм;

– термический анализ образцов лакокрасочных покрытий (ГОСТ Р 53293-2009 [8]);

– термоанализатор синхронный модификации STA 449 F5 Jupiter STA, 60486-15, Германия.

Отбор проб лакокрасочных покрытий проводится при помощи строительных ножей.

2. Обследование проводилось в три этапа, связанных между собой:

– подготовка к проведению обследования, подбор, изучение и анализ представленных исходных данных (проектной и исполнительной документации);

– визуальное обследование;

– детальное (инструментальное) обследование.

3. Оценку технического состояния ЛКП проводили на основе совокупности визуального и инструментального обследований:

– соответствие внешнего вида антикоррозионных покрытий требованиям НТД;

– сопоставление фактических толщин с проектными значениями;

– соответствие реальной адгезии (качественной) антикоррозионных покрытий с поверхностью металлических конструкций требованиям НТД;

– наличие дефектов и коррозии металла;

– результаты лабораторных испытаний контрольных образцов термоаналитическими методами;

– результаты испытаний покрытия.

4. Визуальный контроль основывался на оценке внешнего вида покрытия путем осмотра. При осмотре металлических конструкций, которые защищены антикоррозионными составами, образующими на поверхности объекта слой покрытия, определялось соответствие поверхности покрытия требованиям технической документации на применение состава и наличие:

– необработанных мест;

– трещин, отслоений, вздутий, осыпаний;

– посторонних пятен, инородных включений и других повреждений.

Особое внимание обращалось на места соединений элементов конструкций и труднодоступные места для нанесения лакокрасочного материала.

5. При оценке соответствия показателей толщины и адгезии ЛКП проводился выборочный контроль с использованием контрольно-измерительных приборов:

– измерение толщины ЛКП, нанесенного на металлическую поверхность, проводилось по ГОСТ Р 51694 [9] по неразрушающему методу магнитным толщиномером Salu Tron D4/D5 с требуемым диапазоном измерения и погрешностью измерения не выше 3 %;

– качественные показатели адгезии ЛКП определяли в соответствии с требованиями ГОСТ 15140 [10]. Адгезия лакокрасочных покрытий должна быть не более двух баллов, т. е. присутствует незначительное отслаивание покрытия в местах пересечения решетки, а разрушения наблюдаются не более чем на 5 % площади поверхности решетки.

6. Качественная оценка наличия адгезии ЛКП к стальным конструкциям определялась методом решетчатого надреза по ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013) [11]. Объем оценки – четыре контрольных точки. Решетчатые надрезы выполнялись до окрашиваемой поверхности однолезвийным режущим инструментом с последующим нанесением клейкой ленты, которая удалялась через 5 минут под углом 60° вместе с отслоившимися участками покрытия. Степень разрушения лакокрасочных покрытий определялась в баллах, используя ГОСТ [11]. Для измерения адгезии применялись следующие инструменты и материалы: линейка металлическая, однолезвиевый режущий инструмент и прозрачная липкая лента в соответствии с требованиями ГОСТ [11].

7. Количественные показатели адгезии ЛКП определяли в соответствии с требованиями ISO 16276-1:2007 [12]. Результатом испытания является усилие отрыва, необходимое для нарушения адгезии или когезии в испытуемом покрытии. Возможно также смешанное разрушение – адгезия/когезия. На испытываемые стальные конструкции с антикоррозионным покрытием приклеивались металлические заготовки (грибки) диаметром 20 мм с помощью клея «Момент». Приклеенные образцы после отверждения клея испытывали на отрыв с помощью адгезиметра – гидравлического автоматического Elcometer 510 мод. F510-20T, измеряя усилие, необходимое для отрыва покрытия от металлической поверхности.

8. Диэлектрическую сплошность ЛКП определяли электроискровым методом по ГОСТ 34395-2018 [13] с помощью электроискрового дефектоскопа Elcometer 266. Метод используется для обнаружения нарушений сплошности диэлектрического покрытия на электропроводящих основаниях (сквозных пор и трещин в ЛКП). Основан на фиксации дефектоскопом электрического пробоя дефекта диэлектрического покрытия высоким напряжением, приложенным между расположенными на покрытии электродом и токопроводящим основанием.

9. Термический анализ (ТА) образцов лакокрасочных покрытий проводился в соответствии с ГОСТ Р 53293-2009 [8] с использованием методов: термогравиметрического (ТГ), термогравиметрического по производной (ДТГ) и дифференциально-термического анализа (ДТА). Для получения идентификационных характеристик образцов применяли автоматизированный прибор термического анализа – термоанализатор синхронный модификации STA 449 F5 Jupiter STA 60486-15 (Германия), имеющий программное обеспечение для обработки результатов.

Идентификацию проводили путем сравнения количества ДТГ-максимумов и всех значимых характеристик, определенных для каждого образца покрытия, поступившего на испытания.

Контроль качества огнезащитных покрытий

Принятая рабочей документацией методика проведения контроля качества нанесенных огнезащитных покрытий и определения их эксплуатационной пригодности разработана специалистами ФГБУ ВНИИПО МЧС России. Работы по контролю качества, идентификации и определению эксплуатационной пригодности нанесенных огнезащитных покрытий должны выполняться в соответствии с требованиями [8, 14–16].

Для организации контроля качества огнезащитных работ могут быть привлечены:

– сотрудники судебно-экспертных учреждений ФПС «Испытательная пожарная лаборатория» по субъектам Российской Федерации;

– представители организации, на объектах которой проводились огнезащитные работы;

– представители организации, аккредитованной в области испытаний средств огнезащиты, имеющие опыт в проведении испытаний не менее одного года (целесообразно привлекать представителей организаций, имеющих возможность проведения идентификации и контроля качества покрытий);

– представители организации, производившей огнезащитную обработку.

К группе измерительных и экспериментальных методов относят методы измерения толщины огнезащитных покрытий с помощью различных измерительных приборов и средств измерения, а также методы термического анализа, которые используются для идентификации (установления вида) примененного материала и качества огнезащитного покрытия. Контроль качества огнезащиты на объектах может осуществляться при помощи любого из указанных методов или их различных сочетаний. Наиболее полное представление о качестве огнезащитной обработки дает комплексный подход, характеризующийся совокупностью всех вышеперечисленных методов. Обязательным условием комплексного подхода является использование методов термического анализа, позволяющих установить вид примененного материала и качество огнезащитного покрытия [17].

Контроль по представленной документации предполагает проверку наличия комплекта документации на проведение огнезащитных работ (проект огнезащиты, нормативный документ (НД) на объект огнезащиты и огнезащитные материалы, сертификат соответствия продукции требованиям пожарной безопасности, документы о качестве). По окончании огнезащитных работ составляется акт, который должен содержать сведения о месте проведения работ, виде объектов огнезащиты, их состоянии, нанесенных огнезащитных и грунтовочных составах, их марках, расходе, технологии приготовления и нанесения, об организации-исполнителе, а также подписи лиц, производивших работы и осуществлявших контроль. На огнезащитный материал, кроме сертификата соответствия продукции требованиям пожарной безопасности и документов о качестве (паспорт, свидетельство и т. д.), должна быть представлена НД (технические условия, национальные стандарты, инструкции по нанесению или технологический регламент и т. д.), в которой указывается следующее:

– огнезащитная эффективность;

– условия эксплуатации огнезащищенных объектов;

– технические требования к огнезащитному покрытию или пропиточному составу (толщина покрытия, цвет, внешний вид, плотность, срок службы, совместимые грунты и т. д.).

Во время приемки огнезащитных работ лица, осуществляющие контроль, должны проверить соответствие характеристик примененного огнезащитного материала требованиям проекта огнезащиты, наличие и соответствие срока действия лицензий на проектирование и выполнение работ по огнезащите (или рекомендаций СРО) у организации, производившей огнезащитную обработку, а также наличие другой документации, подтверждающей качество выполнения огнезащитных работ [18].

Визуальный контроль основывается на оценке внешнего вида покрытия при осмотре. Основным критерием оценки является соответствие внешнего вида покрытия требованиям НД на применение огнезащитного состава. На объектах огнезащиты не допускается наличие

необработанных мест, сквозных трещин, отслоений, других видимых признаков разрушения покрытия, изменения цвета и т. д. Для конструкций и изделий, защищенных пропиточными составами, недопустимо наличие посторонних покрытий и загрязнений. Особое внимание следует обращать на обработку соединений элементов конструкций и на места, в которых затруднено нанесение огнезащитных составов. Обнаруженные дефекты фотографируют.

Толщину огнезащитного слоя определяют путем измерений в нескольких местах (1–2 серии измерений на каждые 200 м^2 поверхности). В каждой серии рекомендуется проводить не менее 5 измерений в различных местах одной конструкции с усреднением результатов и оценкой максимальных отклонений величин. Измерения (отбор проб) необходимо проводить преимущественно в местах конструкций, где по визуальным признакам предполагается некачественная обработка или отклонение от нормативной толщины покрытия. Контроль толщины слоя нанесенного огнезащитного покрытия на металлических конструкциях осуществляется с помощью специальных приборов, обеспечивающих необходимую точность измерений. Для покрытий толщиной до 20 мм рекомендуется использовать магнитные толщиномеры, ультразвуковые толщиномеры, микрометры. В целях измерения толщины покрытий, составляющих 10 мм и более, возможно использование штангенциркуля или игольчатого щупа с линейкой.

По результатам измерений определяется усредненное и минимальное значения толщины покрытия. Если имеются сомнения в качестве примененных огнезащитных материалов, получены отрицательные результаты по экспресс-методам, а также в случаях, когда проверка осуществляется на объектах, имеющих важное значение (здания с пребыванием большого количества людей (ночные клубы, театры, кинотеатры, учебные учреждения и т. д.), здания государственных и муниципальных предприятий, хранилища, объекты с общей площадью огнезащитной обработки более 5000 м^2 и т. д.), проводится комплексная проверка, включающая в себя все указанные методы контроля и методику установления вида примененного материала и оценки качества огнезащитной обработки с помощью методов термического анализа. Такой комплексный подход дает наиболее полное представление о качестве огнезащитной обработки [17].

Ежегодно руководитель предприятия обеспечивает проверку состояния огнезащитных покрытий металлических конструкций на предмет отсутствия механических повреждений, отслоений в результате замачивания, коррозии металла подложки и т. д. с составлением протокола проверки состояния огнезащитной обработки. При наличии повреждений покрытия руководитель предприятия обеспечивает устранение повреждений. После завершения срока эксплуатации должен быть выполнен контроль качества нанесенных огнезащитных покрытий, оценка их огнезащитной эффективности в соответствии с требованиями руководства [19].

Результаты

Приведено описание работ по проверке совместимости огнезащитных материалов с грунтовками с помощью сертифицированного и поверенного лабораторного оборудования. Описан лабораторный комплекс, оснащенный современным и технологичным оборудованием для испытаний. Проверка совместимости осуществляется в соответствии с международными стандартами при помощи сертифицированного и поверенного лабораторного оборудования штатными специалистами, имеющими необходимые лицензии, дипломы и сертификаты.

Комплексное покрытие оценивается на наличие или отсутствие дефектов, критичность этих дефектов для последующей эксплуатации лакокрасочной системы, определяется степень адгезии между слоями лакокрасочной системы и оценивается способность покрытия сопротивляться влиянию неблагоприятных факторов окружающей среды. На основании проведенных исследований может даваться рекомендация о допустимости или недопустимости совместного использования тех или иных лакокрасочных материалов.

Выводы

1. Установлены требования к содержанию и последовательности проведения работ по оценке совместимости огнезащитных покрытий по металлу с грунтовками.

2. Показано, что для максимальной эффективности применения огнезащитных материалов и достижения главной цели – длительной огнестойкости конструкций – необходимо уделять должное внимание совместимости материалов при создании проектов и технологии нанесения покрытий.

Список литературы

1. Огнезащита грунтовка для металла [интернет]. Режим доступа: https://stal-kom.ru/ognezashchita-gruntovka-dlya-metalla/
2. ГОСТ 9.407-2015. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Метод оценки внешнего вида. Москва: Стандартинформ; 2015.
3. ГОСТ 25706-83. Лупы. Типы, основные параметры. Общие технические требования. Москва: Издательство стандартов; 1983.
4. ГОСТ 7048-81. Бинокли. Типы, основные параметры и общие технические требования. Москва: Издательство стандартов; 1981.
5. ГОСТ 31993-2013 (ISO 2808:2007). Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. Москва: Стандартинформ; 2014.
6. ГОСТ 166-89 (ИСО 3599-76). Штангенциркули. Технические условия [интернет]. Режим доступа: https://a3-eng.com/assets/files/7461/gost-166-89.pdf
7. ТУ 3936-214-54769955-2008. Наборы щупов номеров 1, 2, 3, 4 [интернет]. Москва; 2008. Режим доступа: https://chelinstrument.ru/docs/stnd/tu%203936-214-54769955-2008%20%5Bchelinstrument.ru%5D.pdf
8. ГОСТ Р 53293-2009. Пожарная опасность веществ и материалов. Материалы, вещества и средства огнезащиты. Идентификация методами термического анализа. Москва: Стандартинформ; 2011.
9. ГОСТ Р 51694-2000 (ИСО 2808-97). Материалы лакокрасочные. Определение толщины покрытия. Москва: Госстандарт России; 2002.
10. ГОСТ 15140-78. Материалы лакокрасочные. Методы определения адгезии. Москва: Стандартинформ; 2009.
11. ГОСТ 31149-2014 (ISO 2409:2013). Материалы лакокрасочные. Определение адгезии методом решетчатого надреза. Москва: Стандартинформ; 2014.
12. ISO 16276-1:2007. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Assessment of, and acceptance criteria for, the adhesion/cohesion (fracture strength) of a coating – Part 1: Pull-off testing [internet]. Available at: https://yandex.by/search/?text=ISO+16276-1%3A2007.+Corrosion+protection+of+steel+-structures+by+protective+paint+systems+%E2%80%93+Assessment+of%2C+and+acceptance+criteria+-for%2C+the+adhesion%2Fcohesion+(fracture+strength)+of+a+coating+%E2%80%93+Part+1%3A+Pull-off+-testing.&lr=157
13. ГОСТ 34395-2018. Материалы лакокрасочные. Электроискровой метод контроля сплошности диэлектрических покрытий на токопроводящих основаниях. Москва: Стандартинформ; 2018.
14. Оценка качества огнезащиты и установление вида огнезащитных покрытий на объектах: Руководство. Москва: ФГУ МЧС России; 2010.

15. Идентификация твердых веществ, материалов и средств огнезащиты при испытаниях на пожарную опасность: Инструкция. Москва: ФГУ МЧС России; 2004.
16. НПБ 232-96. Порядок осуществления контроля за соблюдением требований нормативных документов на средства огнезащиты (производство, применение и эксплуатация) [интернет]. Режим доступа: https://www.derev-grad.ru/stroitelstvo/obespechenie-bezopasnosti-v-hozyaistvennoi-deyatelnosti/pozharnaya-bezopasnost/npb-232-96--poryadok-osuschestvleniya-kontrol.pdf
17. *Собурь С.В.* Огнезащита материалов и конструкций: учебно-справочное пособие: справочник. Москва: ПожКнига; 2016.
18. ГОСТ Р 59637-2021. Средства противопожарной защиты зданий и сооружений. Средства огнезащиты. Методы контроля качества огнезащитных работ при монтаже (нанесении), техническом обслуживании и ремонте. Москва: Стандартинформ; 2021.
19. О противопожарном режиме. Постановление правительства РФ от 25.04.2012 г. № 390, в ред. Постановлений правительства РФ от 17.02.2014 г. № 113, от 23.06.2014 г. № 581 [интернет]. Режим доступа: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=360871
20. ГОСТ 27890-88 (ИСО 4624-78). Покрытия лакокрасочные защитные дезактивируемые. Метод определения адгезионной прочности нормальным отрывом. Москва: Издательство стандартов; 1989.
21. *Ненахов С.А., Пименова В.П., Пименов А.Л.* Проблемы огнезащитной отрасли. Пожаровзрывобезопасность. 2010;19(12):19–26.
22. *Шебеко А.Ю., Смирнов Н.В., Булага С.Н., Булгаков В.В., Дудеров Н.Г., ФГБУ ВНИИПО МЧС России.* Руководство по проведению контроля качества огнезащиты на объектах, оценки качества огнезащитной обработки и оценки сохранения огнезащитных свойств покрытий при их эксплуатации [интернет]. Режим доступа: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746689.pdf
23. Совместимость материалов – залог длительной огнестойкости конструкций. Доклад руководителя направления «Огнезащита» С.Ю. Анисимова на международной научно-практической конференции «Огнезащита XXI» [интернет]. Режим доступа: https://www.vmp-plamcor.ru/publishing/2014-year/667/
24. *Барышников А.А., Горелов С.А., Мустафин Н.Ш.* Анализ перспективных огнезащитных покрытий металлических конструкций. Региональное развитие [интернет]. 2016;(2). Режим доступа: https://elibrary.ru/item.asp?id=26001446
25. *Богданова Ю.Г.* Адгезия и ее роль в обеспечении прочности полимерных композитов. Москва: Издательский центр МГУ имени М.В. Ломоносова; 2010.
26. *Боровик С.И., Трофимова Л.А.* Анализ методик оценки влияния эксплуатационных факторов на огнезащитные покрытия для металлических конструкций. В: Научные исследования: теория, методика и практика: материалы III Международная научно-практическая конференция. Чебоксары; 2017, с. 18–21.
27. Оценка допустимого срока эксплуатации тонкослойных огнезащитных покрытий в различных климатических условиях: методика. Москва: ВНИИПО; 2014.
28. *Теплоухов А.В., Зверев В.Г., Гаращенко А.Н.* Методика и результаты оценки влияния длительной эксплуатации конструкций на основные свойства вспучивающихся огнезащитных покрытий. Пожаровзрывобезопасность. 2016;25(1):9–16.

References

1. Fire protection primer for metal [internet]. Available at: https://stal-kom.ru/ognezashchita-gruntovka-dlya-metalla/ (in Russian).
2. State Standard 9.407-2015. Unified system of corrosion and ageing protection. Paint coatings. Method of appearance rating. Moscow: Standartinform Publ.; 2015. (In Russian).
3. State Standard 25706-83. Magnifiers. Types, basic parameters. General technical requirements. Moscow: Standards Publishing House; 1983. (In Russian).
4. State Standard 7048-81. Binoculars. Types and basic parameters. General technical requirements. Moscow: Standards Publishing House; 1981. (In Russian).
5. State Standard 31993-2013 (ISO 2808:2007). Paint materials. Determination of film thickness. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).

6. State Standard 166-89 (ISO 3599-76). Vernier callipers. Specifications [internet]. Available at: https://a3-eng.com/assets/files/7461/gost-166-89.pdf (in Russian).
7. TU [Specifications] 3936-214-54769955-2008. Sets of number probes 1, 2, 3, 4 [internet]. Available at: https://chelinstrument.ru/docs/stnd/tu%203936-214-54769955-2008%20%5Bchelinstrument.ru%5D.pdf (in Russian).
8. State Standard R 53293-2009. Fire hazard of substances and materials. Materials, substance and fire protective means. Identification by thermal analysis methods. Moscow: Standartinform Publ.; 2011. (In Russian).
9. State Standard R 51694-2000 (ISO 2808-97). Paints and varnishes. Determination of film thickness. Moscow: Gosstandart of Russia.; 2002. (In Russian).
10. State Standard 15140-78. Paintwork materials. Methods for determination of adhesion. Moscow: Standartinform Publ.; 2009. (In Russian).
11. State Standard 31149-2014 (ISO 2409:2013). Paint materials. Determination of adhesive by cross-cut method. Moscow: Standartinform Publ.; 2014. (In Russian).
12. ISO 16276-1:2007. Corrosion protection of steel structures by protective paint systems – Assessment of, and acceptance criteria for, the adhesion/cohesion (fracture strength) of a coating – Part 1: Pull-off testing [internet]. Available at: https://yandex.by/search/?text=ISO+16276-1%3A2007.+Corrosion+protection+of+steel+structures+by+protective+paint+systems+%E2%80%93+Assessment+of%2C+and+acceptance+criteria+for%2C+the+adhesion%2Fcohesion+(fracture+strength)+of+a+coating+%E2%80%93+Part+1%3A+Pull-off+testing.&lr=157.
13. State Standard 34395-2018. Paint materials. Spark test Method for continuity inspection of delectric coatings on conductive substrates. Moscow: Standartinform Publ.; 2018. (In Russian).
14. Assessment of the quality of fire protection and the establishment of the type of fire–resistant coatings on objects: Manual. Moscow: Federal State Institution of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2010. (In Russian).
15. Identification of solids, materials and means of fire protection during fire hazard tests: Instructions. Moscow: Federal State Institution of the Ministry of Emergency Situations of Russia; 2004. (In Russian).
16. NPB 232-96. The procedure of control of normative documents reguirements relating to fire retardance means (production, usage, operation) [internet]. Available at: https://www.derev-grad.ru/stroitelstvo/obespechenie-bezopasnosti-v-hozyaistvennoi-deyatelnosti/pozharnaya-bezopasnost/npb-232-96--poryadok-osuschestvleniya-kontrol.pdf (in Russian).
17. *Sobur S.V.* Fire protection of materials and structures: educational and reference manual. Moscow: Pozhkniga Publ.; 2016. (In Russian).
18. State Standard R 59637-2021. Fire protection means for buildings and structures. Means of fire protection. Methods of quality control of fire-retardant works during installation (application), maintenance and repair. Moscow: Standartinform Publ.; 2021. (In Russian).
19. On fire protection regime. Decree of the Government of the Russian Federation No. 390 of 25.04.2012; as amended Resolutions of the Government of the Russian Federation dated 17.02.2014 No. 113, dated 23.06.2014 No. 581 [internet]. Available at: https://normativ.kontur.ru/document?moduleId=1&documentId=360871 (in Russian).
20. State Standard 27890-88 (ISO 4624-78). Deconlaminable protective coatings (paints). Adhesion determination by normal pull-off method. Moscow: Standards Publishing House; 1989. (In Russian).
21. *Nenakhov C.A., Pimenova V.P., Pimenov A.L.* Problems of the fire-retardant industry. Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and explosion safety. 2010;19(12):19–26. (In Russian).
22. *Shebeko A.Yu., Smirnov N.V., Bulaga S.N., Bulgakov V.V., Duderov N.G., FSBI VNIIPO EMERCOM of Russia*. Guidelines for quality control of fire protection at facilities, assessment of the quality of fire-retardant treatment and assessment of the preservation of fire-retardant properties of coatings during their operation [internet]. Available at: https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293746/4293746689.pdf (in Russian).
23. Compatibility of materials is the key to long–term fire resistance of structures. Report of the head of the direction "Fire protection" S.Yu. Anisimov at the international scientific and practical conference "Fire Protection XXI" [internet]. Available at: https://www.vmp-plamcor.ru/publishing/2014-year/667/ (in Russian).
24. *Baryshnikov A.A., Gorelov S.A., Mustafin N.S.* Analysis of promising fire-resistant coatings of metal structures. Traditions and innovations in construction and architecture. Regional'noe razvitie [internet]. 2016;(2). Available at: https://elibrary.ru/item.asp?id=26001446 (in Russian).

25. *Bogdanova Yu.G.* Adhesion and its role in ensuring the strength of polymer composites. Moscow: Publishing Center of Lomonosov Moscow State University; 2010. (In Russian).
26. *Borovik S.I., Trofimova L.A.* Analysis of methods for assessing the impact of operational factors on fire-resistant coatings for metal structures. In: Scientific research: theory, methodology and practice: materials of the III International Scientific and Practical Conference. Cheboksary; 2017, pp. 18–21. (In Russian).
27. Assessment of the permissible service life of thin-layer flame-retardant coatings in various climatic conditions: methodology. Moscow: VNIIPO; 2014. (In Russian).
28. *Teploukhov A.V., Zverev V.G., Garashchenko A.N.* Methodology and results of assessing the impact of long-term operation of structures on the basic properties of bulging flame-retardant coatings. Pozharovzryvobezopasnost' = Fire and explosion safety. 2016;25(1):9–16. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Юрий Владимирович Кривцов, д-р техн. наук, научный руководитель научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: krivtsov.cniisk@mail.ru
Yuri V. Krivtsov, Dr. Sci. (Engineering), Scientific Director of Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: krivtsov.cniisk@mail.ru

Ирина Романовна Ладыгина, канд. техн. наук, старший научный сотрудник научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: ladigina@yandex.ru
Irina R. Ladygina, Cand. Sci. (Engineering), Senior Researcher of Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: ladigina@yandex.ru

Мария Александровна Комарова, руководитель научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: maria.kom5@mail.ru
Maria A. Komarova, Head of Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: maria.kom5@mail.ru

Алексей Умед-Алиевич Хайдаров, ведущий специалист научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: a.khaydarov@mail.ru
Alexey U.-A. Khaydarov, Leading Specialist of Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: a.khaydarov@mail.ru

Галина Петровна Еремина, заведующий лабораторией научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: Erem-galina@yandex.ru
Galina P. Eremina, Laboratory Head of Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: Erem-galina@yandex.ru

Юрий Михайлович Грошев✉**,** канд. техн. наук, ведущий специалист научного экспертного бюро пожарной, экологической безопасности в строительстве ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: groshev52@gmail.com
Yuri M. Groshev✉**,** Cand. Sci. (Engineering), Leading Specialist of Scientific Expert Bureau of Fire and Environmental Safety in Construction, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: groshev52@gmail.com

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.042.1
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-20-36 EDN: HYPKUO

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ПОДХОДОВ К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ

И.В. ЛЕБЕДЕВА[1,✉], канд. техн. наук
Т.А. ПЕТРОВА[2]

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

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

Аннотация

Введение. Рассматриваются современные стратегии в области обеспечения надежности строительных конструкций в отечественной и зарубежной нормативных базах, включая вероятностные, риск-информированные и полувероятностные критерии оценки надежности, на всех этапах жизненного цикла сооружения. Приведен анализ преимуществ и недостатков предписывающих и параметрических подходов и предложены пути их дальнейшего совершенствования.

Цель. Целью настоящей работы является разъяснение терминологии параметрического нормирования в строительстве, анализ существующих различий в ее трактовке и выработка инновационной стратегии дальнейшего развития отечественной нормативной базы на основе сопоставительного анализа отечественных и зарубежных подходов к оценке надежности.

Материалы и методы. Исследована структура российских и зарубежных нормативных документов в области надежности, приведен их сравнительный анализ. Изучены основные подходы к техническому регулированию в строительной отрасли.

Результаты. Проведенный анализ позволил установить критерии, на основе которых обеспечивается максимально быстрое внедрение инноваций при гарантированном соблюдении безопасности технических решений. Показано, что смысл термина «параметрическое нормирование», заложенный в отечественной стратегии, отличается от зарубежной его интерпретации. Нормативная база РФ построена в основном на полувероятностном подходе и нормировании частных коэффициентов надежности, т. е. отдельных параметров прочности и нагрузок, тогда как в зарубежной нормативной базе, в частности в ИСО 2394:2016 и Еврокодах, акцент смещен на качественные и вероятностные критерии оценки надежности. Однако указывается, что все социальные, экономические критерии и показатели эффективности должны соблюдаться только после выполнения всех требований к надежности и безопасности людей. Таким образом, принципиальных противоречий в наших подходах к нормированию нет, мы постепенно двигаемся в сторону сближения наших подходов при соблюдении преемственности в развитии нормативной базы.

Выводы. Принципы обеспечения надежности проектируемых зданий и сооружений в отечественной, международной и зарубежной нормативных базах достаточно близки и основываются на методе предельных состояний при разумном сочетании обязательных и рекомендуемых параметров. Основной критерий – обеспечение безопасности жизни людей. В современных условиях наряду с традиционными полувероятностными подходами к нормированию необходимо использовать механизмы для быстрого внедрения инноваций и новых технологий в строительстве. В области надежности это дополнительные вероятностные критерии надежности и методы оценки рисков. Эти критерии надежности помогут при выборе оптимальных проектных и технологических решений при строительстве уникальных зданий и сооружений, сооружений повышенного уровня ответственности, а также при оценке существующих конструкций в течение их жизненного цикла.

Ключевые слова: надежность, строительная конструкция, нагрузка, воздействие, особые воздействия, аварийная расчетная ситуация, параметрическое нормирование, риск-информированный подход

Для цитирования: Лебедева И.В., Петрова Т.А. Анализ современных подходов к оценке надежности в строительстве. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):20–36. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-20-36

Вклад авторов
Лебедева И.В. – анализ отечественной и зарубежной нормативных баз в области надежности.
Петрова Т.А. – формулировка современных подходов на основе параметрического метода нормирования.

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 13.07.2023
Поступила после рецензирования 01.08.2023
Принята к публикации 08.08.2023

ANALYSIS OF MODERN APPROACHES TO ASSESSING RELIABILITY IN CONSTRUCTION

I.V. LEBEDEVA[1,✉], Cand. Sci. (Engineering)
T.A. PETROVA[2]

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

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

Abstract

Introduction. The study considers modern strategies for ensuring the reliability of building structures in Russian and foreign regulations, including probabilistic, risk-informed and semi-probabilistic criteria of reliability assessment, at all stages of the life cycle of the structure. The advantages and disadvantages of prescriptive and parametric approaches are analyzed and ways of their further improvement are suggested.

Aim. To clarify the terminology of parametric regulation in construction, to analyze the existing differences in its interpretation, and to develop an innovative strategy for further development of Russian regulation based on a comparative analysis of domestic and foreign approaches to reliability assessment.

Materials and methods. The methodology involved studying the structure of Russian and foreign regulatory documents in the field of reliability and performing their comparative analysis. The study considered the main approaches to technical regulation in the construction industry.

Results. The analysis outlined the criteria underlying the fastest introduction of innovations and ensuring the safety of technical solutions. The study demonstrated the difference between the meaning of the term "parametric regulation" in Russian strategy and its foreign interpretation. The regulation standards of the Russian Federation are based mainly on a semi-probabilistic approach and specification of partial reliability factors, i.e. individual parameters of strength and loads, while in the foreign standards, notably in ISO 2394:2016 and Eurocodes, the emphasis is shifted to qualitative and probabilistic criteria for assessing reliability. However, all social, economic and performance criteria should be observed only after all requirements for the reliability and safety of people have been met. Thus, both Russian and foreign approaches to regulation demonstrate

no fundamental contradictions. The approaches are gradually moving towards convergence while maintaining continuity in the development of the regulatory framework.

Conclusions. The principles of ensuring the reliability of the designed buildings and structures in Russian, international and foreign regulation standards are quite close and are based on the limit state method with a reasonable combination of mandatory and recommended parameters. The main criterion consists in ensuring the safety of human life. Under contemporary conditions, traditional semi-probabilistic approaches to regulation should be accompanied by mechanisms for rapid introduction of innovations and new technologies in construction. In terms of reliability, these mechanisms involve additional probabilistic reliability criteria and risk assessment methods. The reliability criteria will contribute in choosing the optimal design and technological solutions for the construction of unique buildings and structures, higher criticality structures, as well as in assessing existing structures during their life cycle.

Keywords: reliability, building structure, load, impact, special impacts, emergency design situation, parametric regulation, risk-informed approach

For citation: Lebedeva I.V., Petrova T.A. Analysis of modern approaches to assessing reliability in construction. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):20–36. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-20-36

Author contribution statements
Lebedeva I.V. – analysis of Russian and foreign regulatory documents in the field of reliability.
Petrova T.A. – formulation of modern approaches based on the parametric method of regulation.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 13.07.2023
Revised 01.08.2023
Accepted 08.08.2023

Введение

Надежность сооружений обозначает способность строительного объекта выполнять требуемые функции в течение расчетного срока эксплуатации (см. [1, 2]). В основе обеспечения надежности как в нашей стране, так и за рубежом лежит метод предельных состояний. Он является обязательным при проектировании и расчете зданий и сооружений. Расчет по предельным состояниям первой группы обеспечивает прочность, устойчивость и неизменяемость формы строительных конструкций при действии расчетных (максимальных) значений нагрузок и воздействий, по предельным состояниям второй группы – пригодность к нормальной эксплуатации при действии нормативных значений нагрузок и воздействий, в том числе допускаемые прогибы и перемещения, ширину раскрытия трещин, коррозионную стойкость и т. п.

Кроме того, в ГОСТ 27751 [2] введены особые предельные состояния, которые регламентируют требования по обеспечению допускаемого уровня безопасности при аварийных расчетных ситуациях и особых аварийных нагрузках, которые могут привести к прогрессирующему обрушению строительных конструкций по неустановленной заранее причине.

Расчет по особым предельным состояниям производится с учетом развития неупругих деформаций и повреждений, их превышение приводит к разрушению сооружений с катастрофическими последствиями.

В международном стандарте ИСО 2394:2016 [3], помимо предельных состояний по прочности и эксплуатационной пригодности, вводятся условные предельные состояния, связанные с обеспечением долговечности конструкций при расчете по предельным состояниям, которые нечетко определены или трудно вычисляемы, в том числе вводятся дополнительные ступени предельного состояния в случае непрерывно возрастающей функции потерь (например, повреждение, ремонт и разрушение).

1. Структура российских нормативных документов в области надежности

Структура нормативных документов в области безопасности и надежности строительных конструкций и сооружений, действующих в настоящее время, представлена на рисунке.

В указанной структуре можно условно выделить три уровня:

Первый уровень – законодательный (Федеральные законы № 384-ФЗ [1], № 190-ФЗ [4] (Градостроительный кодекс) и № 116-ФЗ [5]), Постановление Правительства РФ № 815 (с изменениями на 20 мая 2022 года) [6], в котором содержится перечень нормативных документов и их отдельных пунктов обязательного применения, и приказ Росстандарта с перечнем документов добровольного применения.

Второй уровень, который можно назвать базовым, – нормативные документы (ГОСТ, ГОСТ Р, СП) и их отдельные пункты, входящие в перечень обязательного применения. В настоящее время к таким документам в области надежности относятся обязательные пункты ГОСТ 27751-2014 [2] (см. 1.2), СП 20.13330.2016 [7] и СП 131.13330.2020 [8].

К третьему уровню, который можно назвать подтверждающим соответствие требованиям безопасности, следует отнести нормативные документы (ГОСТ, ГОСТ Р, СП) и их отдельные

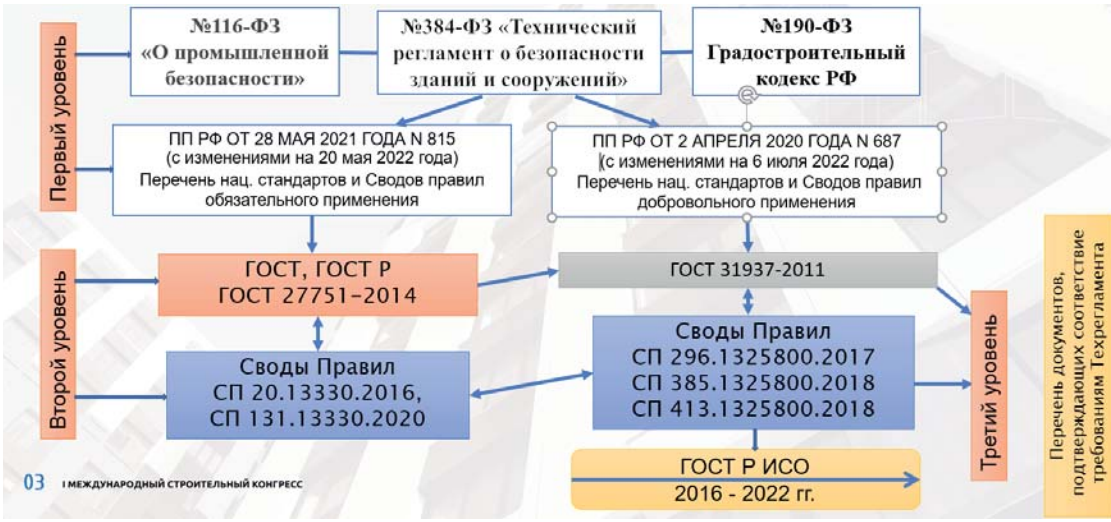


Рис. Структура нормирования надежности и безопасности в России
Fig. The structure of reliability and safety regulation in Russia

пункты, входящие в перечень добровольного применения. В области надежности сооружений к ним следует отнести пункты ГОСТ 27751-2014 [2] и СП 20.13330.2016 [7] добровольного применения, ГОСТ 31937-2011 [9], СП 296.1325800.2017 [10], СП 385.1325800.2018 [11], СП 413.1325800.2018 [12].

Стандарты организаций (СТО), специальные технические условия (СТУ) и другие документы, разрабатываемые в рамках научно-технического сопровождения проектирования отдельных объектов строительства, дополняют требования нормативной базы, конкретизируют требования норм применительно к уникальным и технически сложным объектам, относящимся к классу КС-3 по ГОСТ 27751 [2], либо содержат компенсирующие мероприятия в случае отступления от обязательных требований (СТУ).

1.1. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» [1]

Техническое регулирование – основной инструмент обеспечения безопасности на всех стадиях строительства и эксплуатации объектов за счет разработки и контроля за соблюдением требований к качеству выполняемых строительных работ, используемых строительных материалов и изделий. Посредством стимулирования применения передовых технологических решений, современных строительных материалов и подходов к организации строительства техническое регулирование также оказывает решающее влияние на динамику развития строительной отрасли в целом.

В настоящее время основным документом, регламентирующим техническое регулирование в строительной отрасли, является Федеральный закон от 30 декабря 2009 года № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», распространяющийся на все виды строительных сооружений.

Закон устанавливает минимально необходимые требования к зданиям и сооружениям, включая процессы проектирования, строительства, монтажа, наладки, эксплуатации и утилизации (сноса), в том числе требования:

– механической безопасности;

– пожарной безопасности;

– безопасности при опасных природных процессах и явлениях и (или) техногенных воздействиях;

– безопасных для здоровья человека условий проживания и пребывания в зданиях и сооружениях;

– безопасности для пользователей зданиями и сооружениями;

– доступности зданий и сооружений для инвалидов и других групп населения с ограниченными возможностями передвижения;

– энергетической эффективности зданий и сооружений;

– безопасного уровня воздействия зданий и сооружений на окружающую среду.

Соблюдение в проектной документации положений сводов правил (национальных стандартов), включенных в Перечни, регламентируется заданием на проектирование и (или) обеспечивается в случаях, когда применение таких сводов правил (национальных стандартов) является доказательством соблюдения требований Технического регламента.

Согласно части 6 статьи 15 Федерального закона № 384-ФЗ, в случае отсутствия указанных требований соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения

требованиям безопасности, а также проектируемые мероприятия по обеспечению его безопасности должны быть обоснованы одним или несколькими способами из следующих:

– результаты исследований;

– расчеты и (или) испытания, выполненные по сертифицированным или апробированным иным способом методикам;

– моделирование сценариев возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий, в том числе при неблагоприятном сочетании опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий;

– оценка риска возникновения опасных природных процессов и явлений и (или) техногенных воздействий.

В статье 16 устанавливаются базовые принципы обеспечения прочности и устойчивости строительных конструкций на основе метода предельных состояний, в качестве которых принимается разрушение любого характера, потеря устойчивости формы или положения, нарушение эксплуатационной пригодности или иные явления, которые могут причинить ущерб жизни или здоровью людей, государственному или муниципальному имуществу, окружающей среде и т. д.

Установлены требования к расчетным моделям, расчетные ситуации (установившаяся, переходная и аварийная), а также минимальные значения коэффициентов надежности по ответственности в отношении зданий повышенного, нормального и пониженного уровней ответственности.

Федеральный закон № 384-ФЗ устанавливает правила обязательной и добровольной оценки соответствия зданий и сооружений, а также связанных со зданиями и с сооружениями процессов эксплуатации требованиям настоящего Федерального закона и требованиям проектной документации, требованиям обеспечения безопасности при эксплуатации, а также сносе (демонтаже), требованиям по обеспечению безопасности зданий и сооружений, строительство и эксплуатация которых планируются в сложных природных условиях.

1.2. ГОСТ 27751-2014 «Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения» [2]

ГОСТ 27751-2014 разработан в развитие положений Федерального закона № 384-ФЗ и содержит как обязательные, так и добровольные положения.

ГОСТ 27751 устанавливает классы сооружения в зависимости от его назначения, а также социальных, экологических и экономических последствий их повреждений и разрушений; принципы и критерии при расчете по предельным состояниям первой и второй групп, а также вводит особые предельные состояния при проверке на прогрессирующее обрушение при аварийных расчетных ситуациях, а также организационных мероприятиях, направленных на снижение возможности возникновения аварийных ситуаций.

Приводятся требования по проектированию конструктивных элементов, воспринимающих циклические нагрузки, и их расчету на выносливость и усталостную прочность, требования по учету установившейся, переходной и аварийной расчетных ситуаций. Рассматриваются условия обеспечения долговечности конструкций с учетом условий эксплуатации, влияния окружающей среды, в том числе с учетом ее агрессивности, свойств применяемых материалов.

Вводится перечень предельных состояний и соответствующих критериев, которые необходимо учитывать при проектировании строительного объекта, требования к выбору

расчетных моделей, а также методов расчета по предельным состояниям каждой группы. Приведены определения и соответствующие расчетные значения нагрузок и воздействий, требования к характеристикам материалов и грунтов, к значениям прочностных и деформационных характеристик грунтов, а также к геометрическим параметрам конструкций сооружений, их оснований и фундаментов.

Установлены требования по определению нормативных и расчетных значений нагрузок, коэффициентов надежности по нагрузке, а также порядок установления основных и особых сочетаний нагрузок. Задана обеспеченность нормативных значений прочностных характеристик материалов не ниже 0,95 и приведены требования к методам определения нормативных характеристик материалов и грунтов, геометрическим параметрам, задаваемым в расчетах сооружений, коэффициентам условий работы.

Обязательными являются требования к расчетным моделям сооружения и его конструктивных элементов, нагрузок и воздействий и к расчетным моделям сопротивления строительных конструкций, некоторые требования к контролю качества.

Приведены минимальные значения коэффициента надежности по ответственности в зависимости от класса сооружения и его уровня ответственности, а также цели их использования.

В Изменении № 1 ГОСТ 27751-2014 [2], которое разработано лабораторией надежности сооружений ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» и введено в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии с 01.02.2023 года, внесены следующие основные изменения и дополнения:

– введены новые термины: «научно-техническое сопровождение», «специализированная научно-исследовательская организация», «уровень ответственности», «класс сооружения» и их соответствующие определения;

– установлены основные требования к проведению научно-технического сопровождения при инженерных изысканиях, проектировании, изготовлении и монтаже конструкций зданий и сооружений класса КС-3, а также при их реконструкции или сносе;

– расширен перечень дополнительных мер по обеспечению надежности строительных конструкций при особых воздействиях, включая конструктивные, превентивные и контрольные мероприятия;

– уточнена формулировка для первой группы предельных состояний и определение особых предельных состояний, а также требования к расчетам по предельным состояниям для каждой группы;

– дополнен перечень сооружений с указанием их примерных сроков службы;

– уточнена классификация нагрузок и воздействий и порядок определения их расчетных сочетаний;

– установлены дополнительные требования, которые необходимо соблюдать при сносе зданий и сооружений повышенного уровня ответственности, в том числе касающиеся расчета по предельным состояниям, учета класса и уровня ответственности, оценки технического состояния строительных объектов.

Существенно расширены положения и требования, устанавливающие основные принципы расчета на прогрессирующее обрушение зданий и сооружений и учета аварийных расчетных ситуаций. Впервые установлены требования к расчетам зданий и сооружений, представляющих собой памятники культурного наследия.

Установлено требование о необходимости проводить анализ рисков возникновения аварийных ситуаций для проектируемых зданий и сооружений класса КС-3, расположенных в зонах потенциального возникновения опасных климатических явлений (ураганы, смерчи, тайфуны, угроза подтопления территории вследствие ливней, паводков, береговая эрозия, приводящая к затоплению прибрежной территории морем), геокриологической опасности вследствие оттаивания вечной мерзлоты, неблагоприятных геологических процессов, проявления карстовой и термокарстовой опасностей.

Установлены дополнительные требования к мерам безопасности при реконструкции и сносе сооружений повышенного уровня ответственности, к контролю качества и оценке технического состояния. Уточнен перечень сооружений, относящихся к классам КС-1, КС-2 и КС-3, в том числе порядок установления класса для уникальных, особо опасных и технически сложных объектов.

1.3. Требования к нагрузкам и воздействиям

Основным нормативным документом, регламентирующим нагрузки и воздействия на здания, сооружения и их основания, является **СП 20.13330.2016** (с Изменениями № 1–4) [7]. В нем установлены требования к нагрузкам, воздействиям и их расчетным сочетаниям, а также прогибам и перемещениям строительных конструкций. Указанный СП включает пункты, входящие в перечень как обязательного, так и добровольного применения.

Требования к особым проектным нагрузкам, в том числе взрывным, ударным и экстремальным климатическим, установлены в **СП 296.1325800.2017** (с Изменениями № 1, 2) [10], требования к защите от прогрессирующего обрушения при экстремальных особых воздействиях и аварийных расчетных ситуациях – в **СП 385.1325800.2018** (с Изменениями № 1, 2) [11], требования к проектированию зданий и сооружений с учетом динамических воздействий – в **СП 413.1325800.2018** [12]. Все указанные СП отнесены к документам добровольного применения.

СП 296.1325800.2017 [10] устанавливает требования по учету особых нагрузок и воздействий при проектировании зданий и сооружений классов КС-2 и КС-3 нормального и повышенного уровней ответственности по предельным состояниям первой группы, а также требования по обеспечению надежности строительных конструкций и оснований при аварийных ситуациях природного, техногенного и антропогенного характеров в соответствии с положениями ГОСТ 27751 [2].

Данный СП регламентирует только нормируемые (проектные) особые нагрузки и воздействия, которые должны учитываться при проектировании наряду с основными по предельным состояниям первой и второй групп, а именно:

– экстремальные климатические нагрузки и воздействия (снеговые, ветровые, гололедные и температурные), имеющие период повторяемости 100 лет и более;

– нагрузки при внутренних и внешних взрывах;

– ударные, в том числе нагрузки при столкновении транспортных средств, ремонтной и строительной техники с частями сооружения, удар дорожных транспортных средств по опорным частям сооружений, нагрузки, вызванные сходом с рельсов транспортных средств под конструкциями или вблизи конструкций; падение вертолета на сооружение, удар погрузчика;

– особые нагрузки от падения снега при его сползании с вышележащего покрытия на нижележащее покрытие, примыкающее к перепаду высот, или на прилегающую территорию и т. п.;

– нагрузки от пожарных автомобилей на стилобатные и подземные части зданий.

Действие особых аварийных воздействий учитывается расчетом сооружений на прогрессирующее обрушение согласно **СП 385.1325800.2018** [11] по особым предельным состояниям или без проведения расчетов, на основе оценки рисков и разработки системы превентивных и конструктивных мероприятий по защите от прогрессирующего обрушения.

2. Оценка надежности в международных и зарубежных стандартах

С целью обеспечения представительства РФ и проведения необходимой работы в рамках ТК 98 ИСО в 2017 году была создана рабочая группа РГ № 8 «Основы проектирования строительных конструкций» технического комитета по стандартизации ТК 465 «Строительство», зеркального ИСО/ТК 98 «Основы расчета строительных конструкций». Эксперты российской организации по стандартизации ГОСТ Р ИСО, входящие в указанную рабочую группу, активно сотрудничают с Международной организации по стандартизации (ИСО), представляя Россию как страну-участника и одного из инициаторов и организаторов ее создания.

К основным зарубежным нормативным документам в области надежности, которые рассматриваются в настоящем обзоре, следует отнести ISO 2394:2016 ed.4 [3], ISO 13824:2020 [13], ISO 8930:2021 ed.2 [14], Еврокод EN 1990:2002+A1 [15] и нормы других стран.

Все указанные документы в действующей редакции базируются на трех основных альтернативных подходах к оценке надежности или уровнях верификации.

1. Риск-информированный:

При условии учета аспектов безопасности людей, согласно законодательству и нормам проектирования, сумма всех расходов (затраты на строительство, техническое обслуживание и т. д.) и экономические риски (в отношении отказа или неисправности) должны быть сведены к минимуму.

2. Основанный на надежности:

Конструкция должна соответствовать набору требований к надежности, сформулированных в виде максимально допустимых вероятностей отказа или минимальных значений для уровней надежности.

3. Полувероятностный:

Конструкция должна удовлетворять набору неравенств, используя определенные расчетные значения основных переменных и частные коэффициенты надежности.

Полувероятностный подход, основанный на частных коэффициентах надежности при определении расчетных значений нагрузок, воздействий и сопротивлений материалов, является базовым методом нормирования и применяется при проектировании большинства объектов строительства как в нашей стране, так и за рубежом.

В стандарте **ИСО 2394-2015** [3] указывается, что более низкие уровни верификации должны быть откалиброваны до более высоких уровней с использованием принципов калибровки норм. Калибровка выполняется комитетами по нормативным документам, что позволяет разработчику использовать методы проверки уровня 3; только для специальных конструкций будет выполняться проверка, основанная на надежности или на оценке риска (уровни 1 и 2).

Указывается также, что в тех случаях, если нет риска гибели людей, связанного с отказами конструкций, целевые уровни вероятности отказа могут быть выбраны исключительно на основе экономической оптимизации.

В качестве перспективных направлений развития Еврокодов и международных стандартов (ИСО) указываются следующие цели:

– поддерживать социальную функциональность и способствовать устойчивому развитию общества в течение срока службы сооружений;

– с надлежащей степенью риска и надежности соответствовать требованиям к производительности;

– выдерживать экстремальные и (или) часто повторяющиеся и постоянные воздействия, а также воздействия окружающей среды;

– обеспечивать достаточную надежность, чтобы не подвергаться серьезным повреждениям или каскадным отказам в результате чрезвычайных и, возможно, непредвиденных событий, таких как стихийные бедствия, несчастные случаи или человеческие ошибки.

Устойчивость развития общества связывается с показателями эффективности, такими как:

– безопасность для людей;

– надежность в отношении достижения заявленных целей;

– качество окружающей среды;

– экономическая эффективность;

– сведение к минимуму выбросов CO_2;

– сведение к минимуму потребления природных ресурсов;

– минимальное потребление энергии.

Будущее развитие европейских и международных стандартов связывается с решением следующих задач:

1. Разработка стандартов полностью на вероятностной основе. Надежность сооружений для уровня 3 оценивается на основе полного вероятностного анализа (оценки вероятности обрушения).

2. Использование индексов надежности.

3. Внедрение риск-информированных подходов, создание концептуальной основы управления рисками.

4. Оценка живучести строительных конструкций.

5. Учет изменений климата.

Можно предположить, что эти амбициозные задачи не всегда реалистичны и выполнимы и могут осложнить реальное проектирование.

В **Еврокоде EN 1990:2002** [15] сформулированы базовые требования по безопасности, надежности, расчетному сроку службы объектов, а также их долговечности, приведены принципы проектирования по предельным состояниям, установлены расчетные ситуации, которые должны приниматься во внимание в расчетах по предельным состояниям первого и второго рода (основным и по пригодности к эксплуатации).

Он содержит требования к анализу конструкций и проектированию на основе испытаний, к проверке методом частных коэффициентов надежности в расчетах по предельным состояниям, а также к свойствам материалов, строительных изделий и геометрическим параметрам.

Обязательным является расчет с использованием метода частных коэффициентов надежности. Допускается (по согласованию с соответствующими органами) расчет на основе

вероятностных подходов. Предельные состояния относятся к расчетным ситуациям, которые подразделяются на постоянные, временные и особые, а также сейсмические.

Введены принципы и правила применения. Принципы обязательны к применению и обозначены буквой Р. Правила – добровольного применения и не имеют специального обозначения. Допускается использовать альтернативные правила проектирования, отличные от правил применения, заданных в EN 1990 [15], при условии, что показано, что альтернативные правила согласуются с соответствующими принципами и, по крайней мере, эквивалентны в отношении безопасности конструкций, пригодности к эксплуатации и долговечности, ожидаемых при использовании Еврокодов. Они задаются в национальном приложении или в отдельном проекте.

3. Внедрение новых подходов к нормированию

Согласно Стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года с прогнозом до 2035 года, утвержденной распоряжением Правительства Российской Федерации от 31 октября 2022 года № 3268-р, параметрический метод нормирования – метод установления нормативных требований, при котором установление обязательных требований применяется только к эксплуатационным (функциональным) характеристикам объекта технического регулирования, в том числе к количественным параметрам, вне зависимости от его конструкции и исполнения. При этом способы достижения этих требований устанавливаются на добровольной основе с возможностью применения иных способов (подходов) на альтернативной основе.

Стратегией предусмотрен переход от предписывающего метода нормирования к параметрическому, обеспечивающему максимально быстрое внедрение инноваций при гарантированном соблюдении безопасности технических решений.

Необходимо отметить, что сам перевод термина, введенного американскими учеными Андреем Серых (Snip Register Inc, Chicago) и Мичамом Брайаном (Worcester Polytechnic Institute), неверен. Термин *performance-based* следовало бы перевести как «функционально-ориентированный». Указанный методический подход хорошо известен в профессиональной среде еще с середины 1990-х годов. Основы этого метода заложены в СНиП 10-01«Система нормативных документов в строительстве. Основные положения» [16].

Отечественная нормативная база разрабатывалась лучшими научными кадрами страны на протяжении многих десятилетий и достаточна для решения всех задач реального проектирования, поэтому при одинаковом уровне надежности, который они примерно обеспечивают, она гораздо более удобна для применения.

Разработанные в СССР нормы были признаны лучшими в мире и легли в основу ряда зарубежных норм, в том числе Еврокодов. При этом следует отметить, что проектирование по российским нормам обеспечивает наиболее оптимальный баланс эксплуатационной надежности и материалоемкости.

С принятием Федерального закона № 184-ФЗ «О техническом регулировании» [17] и отменой в начале 2000-х СНиП 10-01 «Система нормативных документов в строительстве. Основные положения» [16] логика существовавшей ранее комплексной системы была нарушена, понятие «строительных норм и правил» исключено из законодательства.

В настоящее время основной подход в области технического регулирования строительства сводится к планомерному отказу от обязательных требований. С 01.09.2022 вступило в силу постановление Правительства РФ № 914 [18], которым вносятся изменения в постановление Правительства РФ № 815 (Обязательный перечень) [6], предусматривающие исключение из Обязательного перечня всех СП, кроме ГОСТ 27751-2014 [2], СП 20.13330.2016 [7], СП 28.13330.2017 [19], СП 59.13330.2020 [20], СП 131.13330.2020 [8].

Предполагается, что исключение обязательных требований позволит снизить регуляторную нагрузку на бизнес. Однако цель технического регулирования состоит прежде всего в обеспечении надежности, безопасности продукции для конечного потребителя, а не в сокращении требований к бизнесу. Любые нормы, любые требования безопасности приводят к удорожанию и создают нагрузку на бизнес.

Отказ от обязательных требований ставит под вопрос и переход на параметрическое нормирование, точнее на функционально-ориентированную (гибкую) систему нормирования, известную в мире как *performance-based requirement*. Такая система должна иметь иерархию нормативных документов, что затруднительно в ситуации, когда все своды правил Минстроя России имеют одинаковый статус. В отличие от традиционного *prescriptive* (или предписывающего) подхода, когда в нормативных документах приводятся описания конструкций и предписываются методы их расчета и свойства применяемых материалов, в документах нового типа на основе концепции поведения, находящих все большее распространение в мировой практике, должны устанавливаться лишь параметры поведения строительных сооружений в ходе их эксплуатации или указываться иные цели, которые должны быть удовлетворены или достигнуты. Такие документы должны быть обязательными, а предписывать, как проектировать, строить и какие материалы применять, следует в документах добровольного применения.

Новой тенденцией в сфере технического регулирования строительства также стал отказ от специальных технических условий (СТУ). Предложения по отмене СТУ стоят в одном ряду с принимаемыми в последнее время Минстроем России мерами по наведению порядка в этом нормативном секторе, поскольку в последние годы они превратились в «бизнес-проект» всевозможных организаций и стали оказывать серьезную дополнительную нагрузку на инвестиционный климат в строительной отрасли.

В то же время возникали, возникают и будут возникать случаи, когда необходимо проектировать уникальные, опасные и технически сложные объекты капитального строительства, на которые реально отсутствуют нормативные требования. И здесь без СТУ не обойтись.

Отмена частей 8 и 9 статьи 6 Технического регламента создает препятствия для случаев, когда требования не установлены действующими нормативными документами. В связи с этим представляется более целесообразным сохранение возможности разработки СТУ с переработкой порядка их разработки и согласования.

В силу данной тенденции в области технического регулирования особенно актуальным становится метод оценки рисков. В случае отсутствия или отступления от добровольных требований механизмом СТУ воспользоваться нельзя, поэтому соответствие проектных значений и характеристик здания или сооружения требованиям безопасности, а также проектируемые мероприятия по обеспечению его безопасности должны быть обоснованы способами, установленными в части 6 статьи 15 Федерального закона № 384-ФЗ [1], в том числе с помощью оценки риска, которая сейчас никак не регламентирована в сводах правил

на проектирование. Следует обратить внимание на тот факт, что огромное количество СТУ, прошедших согласование в Минстрое в последние годы, в большинстве случаев были инициированы экспертами экспертных организаций разного уровня, не желавших брать на себя ответственность за принятые решения разработчиков проектов, в рамках вышеупомянутых способов, установленных в части 6 статьи 15.

Дополнительные вероятностные критерии надежности и методы оценки рисков помогут также при выборе оптимальных проектных и технологических решений при строительстве уникальных зданий и сооружений, сооружений повышенного уровня ответственности, а также при оценке существующих конструкций в течение их жизненного цикла. Мы двигаемся в указанном направлении, используя методики, основы которых были заложены в нашей стране более полувека назад и стремительно развиваются в последние годы.

Непосредственное применение международных и зарубежных стандартов при проектировании объектов строительства на территории РФ без учета требований отечественной нормативной базы и климатических условий территории России, без подготовки профессиональных кадров проектировщиков и экспертов, способных работать в данной парадигме, было бы неправильным и может привести к самым серьезным последствиям.

При этом необходимо воспрепятствовать дублированию положений действующих нормативных документов во вновь разрабатываемых национальных стандартах или стандартах организаций и распространению документов, не отвечающих требованиям безопасности вследствие недостаточной квалификации их разработчиков. Однако следует отметить, что без обязательного государственного надзора и контроля за соблюдением требований технического регламента и документов обязательного применения безопасность жизни и здоровья людей, сохранность оборудования и т. п. могут оказаться под угрозой.

Выводы

1. В отечественной нормативной базе обязательные требования по обеспечению надежности и безопасности сооружений содержатся в Федеральном законе № 384-ФЗ [1], ГОСТ 27751-2014 [2], СП 20.13330.2016 [7] и ряде других документов. Остальные стандарты и своды правил обеспечивают требования безопасности на добровольной основе.

2. В международных стандартах ИСО 2394:2016 [3], новой редакции Еврокода 1990 [15] и стандартах ряда других зарубежных стран в последнее время широко внедряются три уровня верификации надежности: риск-информированный подход; подход, основанный на вероятностной оценке надежности; полувероятностный подход, основанный на расчетных значениях основных переменных и частных коэффициентах надежности.

3. Целью международных стандартов в их новейших редакциях является:

– поддержание социальной функциональности и устойчивого развития общества в течение срока службы сооружений;

– соответствие требованиям к производительности;

– необходимость выдерживать экстремальные и (или) часто повторяющиеся и постоянные воздействия, а также воздействия окружающей среды;

– обеспечение достаточной надежности;

– соответствие экономическим показателям эффективности.

4. Аналогичные подходы активно развиваются в нашей стране и реализованы в положениях СП 296.1325800.2017 [10], СП 385.1325800.2018 [11] и других нормативных документах различного уровня.

5. Применение межгосударственного стандарта ГОСТ 27751-2014 [2] с учетом Изменения № 1 позволит оптимизировать проектирование зданий и сооружений, что повысит их экономическую эффективность. Документ будет способствовать повышению уровня безопасности людей в зданиях и сооружениях, отвечая современным требованиям обеспечения надежности, качества строительства и эксплуатации зданий и сооружений.

6. Принципы обеспечения надежности проектируемых зданий и сооружений в отечественной, международной и зарубежной нормативных базах достаточно близки и основываются на методе предельных состояний при разумном сочетании обязательных и рекомендуемых параметров. Основной критерий – обеспечение безопасности жизни людей.

7. В зарубежной нормативной базе и, в частности, в ИСО 2394:2016 [3] прямо указывается, что все социальные, экономические критерии и показатели эффективности должны соблюдаться только после выполнения всех требований к надежности и безопасности людей. Поэтому принципиальных противоречий в наших подходах к нормированию нет.

8. В основу обеспечения требований надежности в нормативной базе нашей страны положен полувероятностный метод частных коэффициентов надежности, т. е. отдельных параметров прочности и нагрузок, который широко применяется как один из основных методов оценки надежности конструкций в нормативной базе большинства стран мира.

9. Безусловно, в современных условиях необходимо внедрять в нормирование механизмы для быстрого внедрения инноваций и новых технологий в строительстве. В области надежности – дополнительные вероятностные критерии надежности и методы оценки рисков. Эти критерии надежности помогут при выборе оптимальных проектных и технологических решений при строительстве уникальных зданий и сооружений, сооружений повышенного уровня ответственности, а также при оценке существующих конструкций в течение их жизненного цикла.

10. Для соблюдения требований надежности и безопасности строительных конструкций зданий и сооружений на протяжении всего их срока службы (или жизненного цикла) необходим государственный надзор и контроль.

11. Уровень надежности и безопасности сооружений отражает уровень развития общества в целом, и нормы проектирования в нашей стране должны неуклонно совершенствоваться, в том числе с учетом мирового опыта.

Список литературы

1. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений. Федеральный закон от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ [интернет]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/

2. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения (с Изменением № 1) [интернет]. Режим доступа: https://protect.gost.ru/default.aspx/document.aspx?control=7&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=249345

3. ГОСТ Р ИСО 2394-2016. Конструкции строительные. Основные принципы надежности (ISO 2394:1998, General principles on reliability for structures, IDT). Москва: Стандартинформ; 2016.

4. Градостроительный кодекс Российской Федерации от 29 декабря 2004 г. № 190-ФЗ [интернет]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/
5. О промышленной безопасности опасных производственных объектов. Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ [интернет]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/
6. Об утверждении перечня национальных стандартов и сводов правил (частей таких стандартов и сводов правил), в результате применения которых на обязательной основе обеспечивается соблюдение требований Федерального закона «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», и о признании утратившим силу постановления Правительства Российской Федерации от 4 июля 2020 г. № 985. Постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. № 815 [интернет]. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202105310010.
7. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия(с Изменениями № 1, № 2, № 3, № 4). Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/456044318
8. СП 131.13330.2020. Строительная климатология (с Изменением № 1). [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/573659358
9. ГОСТ 31937-2011. Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. Москва: Стандартинформ; 2014.
10. СП 296.1325800.2017. Здания и сооружения. Особые воздействия (с Изменениями № 1, 2) [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/555600219
11. СП 385.1325800.2018. Защита зданий и сооружений от прогрессирующего обрушения. Правила проектирования. Основные положения (с Изменениями № 1, № 2). [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/551394640
12. СП 413.1325800.2018. Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования. Москва: Стандартинформ; 2019.
13. ISO 13824:2020. Bases for design of structures – General principles on risk assessment of systems involving structures [internet]. Available at: https://www.iso.org/standard/71005.html
14. ISO 8930:2021. General principles on reliability for structures — Vocabulary [internet]. Available at: https://www.iso.org/standard/74452.html
15. EN 1990:2002+A1 Eurocode – Basis of structural design [internet]. Available at: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf
16. СНиП 10-01-94. Система нормативных документов в строительстве. Основные положения [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/5200307
17. О техническом регулировании. Федеральный закон от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ [интернет]. Режим доступа: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/
18. О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 28 мая 2021 г. № 815. Постановление Правительства РФ от 20 мая 2022 г. № 914 [интернет]. Режим доступа: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205240002
19. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии (с Изменениями № 1, № 2, № 3). Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85 [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/456069587
20. СП 59.13330.2020. Доступность зданий и сооружений для маломобильных групп населения (с изменением № 1). Актуализированная редакция СНиП СНиП 35-01-2001 [интернет]. Режим доступа: https://docs.cntd.ru/document/573659328

References

1. Technical Regulations on the safety of Buildings and structures. Federal Law No. 384-FZ of December 30, 2009 [internet]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_95720/ (in Russian).
2. State Standrd 27751-2014. Reliability for constructions and foundations. General principles (with Change No. 1) [internet]. Available at: https://protect.gost.ru/default.aspx/document.aspx?control=7&baseC=-1&page=0&month=-1&year=-1&search=&RegNum=1&DocOnPageCount=15&id=249345 (in Russian).
3. State Standard R ISO 2394:2016. Building constructions. General principles on reliability (ISO 2394:1998, General principles on reliability for structures, IDT). Moscow: Standartinform; 2016. (In Russian).

4. Town-Planning Code of the Russian Federation No. 190-FZ of December 29, 2004 [internet]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_51040/ (in Russian).
5. On Industrial Safety of Hazardous Production Facilities. Federal Law No. 116-FZ of July 21, 1997 [internet]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_15234/ (in Russian).
6. On Approval of the List of National Standards and Codes of Rules (Parts of Such Standards and Codes of Rules), as a Result of which Compliance with the Requirements of the Federal Law "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" is Mandatory, and on Invalidation of the Government Resolution No. 985 of the Russian Federation dated July 4, 2020. Resolution of the Government of the Russian Federation No. 815 of May 28, 2021 [internet]. Available at: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202105310010 (in Russian).
7. SP 20.13330.2016. Loads and actions (with Changes No. 1, No. 2, No. 3, No. 4). Updated version of SNiP 2.01.07-85* [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/456044318 (in Russian).
8. SP 131.13330.2020. Building Climatology (with Change No. 1). Updated version of SNiP 23-01-99* [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/573659358 (in Russian).
9. State Standard 31937-2011. Buildings and constructions. Rules of inspection and monitoring of the technical condition. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russian).
10. SP 296.1325800.2017. Buildings and structures. Accidental actions (with Changes No. 1, No. 2) [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/555600219 (in Russian).
11. SP 385.1325800.2018. Protection of buildings and structures against progressive collapse. Design code. Basic statements (with Changes No. 1, No. 2) [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/551394640 (in Russian).
12. SP 413.1325800.2018. The buildings and structures under dynamic actions. Design rules. Moscow: Standartinform; 2016. (In Russian).
13. ISO 13824:2020. Bases for design of structures — General principles on risk assessment of systems involving structures [internet]. Available at: https://www.iso.org/standard/71005.html
14. ISO 8930:2021. General principles on reliability for structures — Vocabulary [internet]. Available at: https://www.iso.org/standard/74452.html
15. EN 1990:2002+A1 Eurocode – Basis of structural design [internet]. Available at: https://www.phd.eng.br/wp-content/uploads/2015/12/en.1990.2002.pdf
16. SNiP 10-01-94. System of normative documents in construction. Basic principles [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/5200307 (in Russian).
17. On Technical Regulation. Federal Law No. 184-FZ of December 27, 2002 [internet]. Available at: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40241/ (in Russian).
18. On Amendments to the Decree of the Government of the Russian Federation of May 28, 2021 No. 815. Decree of the Government of the Russian Federation of May 20, 2022 No. 914 [internet]. Available at: http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202205240002 (in Russian).
19. SP 28.13330.2017. Protection against corrosion of construction (with Changes No. 1, No. 2, No. 3). Updated version of SNiP 2.03.11-85 [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/456069587 (in Russian).
20. SP 59.13330.2020. Accessibility of buildings and structures for persons with reduced mobility (with Change No. 1). Updated version of SNiP 35-01-2001 [internet]. Available at: https://docs.cntd.ru/document/573659328 (in Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Ирина Владимировна Лебедева✉**,** канд. техн. наук, заведующий лабораторией надежности сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: ilebedeva61@gmail.com
тел.: +7 (499) 174-79-98
Irina V. Lebedeva✉**,** Cand. Sci. (Engineering), Head of Laboratory of Structural Reliability, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: ilebedeva61@gmail.com
tel.: +7 (499) 174-79-98

Татьяна Александровна Петрова, эксперт научно-технической продукции, департамент научно-методической деятельности АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: petrovata@cstroy.ru
тел.: +7 (916) 553-43-27

Tatiana A. Petrova, Expert of Scientific and Technical Products, Department of Scientific and Methodological Activities, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: petrovata@cstroy.ru
tel.: +7 (916) 553-43-27

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.012+666.982
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-37-45 EDN: JOAGTR

НЕКОТОРЫЕ СООБРАЖЕНИЯ О ПОСТРОЕНИИ СОВРЕМЕННОЙ ТЕОРИИ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ (ПРОДОЛЖЕНИЕ)

В.Г. НАЗАРЕНКО, д-р техн. наук
А.И. ЗВЕЗДОВ✉, д-р техн. наук
Е.А. ЛАРИОНОВ, д-р техн. наук
АО «НИЦ «Строительство», 2-я Институтская ул., д. 6, г. Москва, 109428, Российская Федерация

Аннотация

Введение. Статья развивает результаты исследования, опубликованного авторами ранее, применив их для построения нелинейной диссипативной теории силового сопротивления бетона сжатию. Авторами статьи решается важная и актуальная задача, направленная на совершенствование теории расчета бетонных и железобетонных конструкций с учетом накопленных к настоящему моменту знаний.

Цель. Показать возможный путь построения нелинейной диссипативной теории силового сопротивления бетона сжатию в условиях отсутствия нормативных режимов нагружения, используя вместо них нормативную классификацию нагрузок.

Результаты. Уравнение состояния теории упруго-ползучего тела, наиболее точной из существующих на сегодня, но и наиболее трудоемкой в практическом использовании, без потери ее положительных свойств, сведено по форме к уравнению нестареющего бетона с его простотой в применении. При этом уравнение состояния бетона в практически важных случаях разрешается в элементарных функциях и замкнутом виде.

Подавляющее большинство известных в научной литературе о железобетоне сведений о характере кривых ползучести в области надежной работы конструкций свидетельствует об их гладкости и непрерывности. Это дает основание для распространения данных, полученных при кратковременных испытаниях, на весь временной интервал, открывая возможность экспресс-анализа дерформативных свойств бетона.

Приведена оценка обратимости деформаций ползучести. Обнаружена диссипативность упругих деформаций. Построена нелинейная связь деформации с постоянным уровнем напряжения, на основе которой показан возможный путь построения нелинейной диссипативной теории силового сопротивления бетона сжатию в условиях отсутствия нормирования режимов нагружения, используя вместо них нормативную классификацию нагрузок.

Выводы. В заключение отмечается, что рассмотренные экспериментальные данные в связи с их малочисленностью дают качественную информацию. Количественную оценку можно получить, проведя необходимое количество воспроизведений опытов.

Ключевые слова: теория расчета, бетон, ползучесть бетона, нагрузки, релаксация, уровень нагружения, деформация, силовое сопротивление, простое нагружение

Для цитирования: Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А. Некоторые соображения о построении современной теории расчета железобетонных конструкций (продолжение). *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):37–45. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-37-45

Вклад авторов
Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 20.06.2023
Поступила после рецензирования 19.07.2023
Принята к публикации 25.07.2023

CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES: CONSIDERATIONS ON DEVELOPING NEW THEORY (CONTINUED)

V.G. NAZARENKO, Dr. Sci. (Engineering)
A.I. ZVEZDOV✉, Dr. Sci. (Engineering)
E.A. LARIONOV, Dr. Sci. (Engineering)
JSC Research Center of Construction, 2nd Institutskaya str., 6, Moscow, 109428, Russian Federation

Abstract

Introduction. The authors develop the results of their previously published study in order to build up a nonlinear dissipative theory of concrete compressive strength. The present paper explores possibilities to improve the theory of calculation of concrete and reinforced concrete structures in the light of the accumulated knowledge.

Aim. To introduce an approach to developing a nonlinear dissipative theory of concrete compressive strength in the absence of regulatory documents for loading modes, using instead the standard classification of loads.

Results. The authors refer to the non-linear hereditary creep theory as the most accurate but time-consuming, and keeping its positive properties, reduce its equation of state to the equation of ageless concrete with its simplicity in application. In addition, the equation of state of concrete is solved in elementary functions and closed form in practically important cases.

The overwhelming majority of published scientific data on the behavior of creep curves in the area of reliable performance of reinforced concrete structures indicates smoothness and continuity of the curves. Considering that, the data obtained in short-term tests can be extended to the whole time interval, thus providing possibility for express analyses of the strain properties of concrete.

The study estimated the reversibility of creep strain and found out dissipativity of elastic strain. The authors established a nonlinear relation between strain and constant stress and introduced an approach to developing a nonlinear dissipative theory of concrete compressive strength in the absence of regulatory documents for loading modes, using instead the standard classification of loads.

Conclusions. The considered experimental data were recognized to provide qualitative information due to their apparent deficit. In order to obtain quantitative evaluation, the experiments should be reproduced a sufficient number of times.

Keywords: calculation theory, concrete, concrete creep, loads, relaxation, loading level, strain, force resistance, simple loading

For citation: Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A. Calculation of reinforced concrete structures: considerations on developing new theory (continued). *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):37–45. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-37-45

Author contribution statements
All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 20.06.2023
Revised 19.07.2023
Accepted 25.07.2023

В линейной постановке зависимость деформации от уровня напряжений сжатия при простейшем нагружении призмы [1]:

$$\varepsilon(t, \tau) = \eta(\tau)\varepsilon_R[1 + \varphi f(t - \tau)], \quad (1)$$

где $f(t - \tau) = 1 - ke^{-\gamma(t-\tau)}$ – функция накопления деформаций;

$\varepsilon_R = \frac{R(28)}{E(28)}$ – предельная сжимаемость бетона в возрасте 28 суток.

Принятая запись функции накопления деформаций ползучести в момент нагружения определяет восходящий участок прямой графика меры ползучести, который реализуется за несопоставимо короткий отрезок времени по сравнению со временем эксплуатации конструкции, когда проявляется сама ползучесть. Этот участок сейчас относят к ползучести и называют ее быстронатекающей, отнеся ее к необратимым деформациям. Е. Н. Щербаков называл меру ползучести мерой в начальных отрезках.

Эволюция деформаций определяется дифференциальным соотношением

$$d\varepsilon(t,\tau) = d\eta(\tau)\varepsilon_R[1 + \varphi f(t - \tau)], \quad (2)$$

которое является ОДУ первого порядка, решая которое прямым интегрированием, получаем уравнение для деформаций в зависимости от изменения уровня напряжений во времени

$$\varepsilon(t, t_0) = a\eta(t_0) - b\eta(t) + be^{-\gamma t} \int_{t_0}^{t} e^{\gamma\tau} \frac{\partial\eta(\tau)}{\partial\tau} d\tau, \quad (3)$$

где $a = \varepsilon_R(1 + \varphi)$ и $b = \varepsilon_R k\varphi$. Если взять интеграл по частям, то получим

$$\varepsilon(t, t_0) = \varepsilon_R\eta(t_0)[1 + \varphi f(t - t_0)] - be^{-\gamma t} \int_{t_0}^{t} \eta(\tau)\frac{\partial e^{\gamma\tau}}{\partial\tau} d\tau, \quad (3a)$$

Обычно в научной литературе это уравнение называют уравнением механического состояния. Решая (2) относительно уровней напряжения, получаем уравнение релаксации

$$\eta(t)\varepsilon_R = \int_{t_0}^{t} \frac{1}{[1+\varphi f(t-\tau)]} \frac{\partial\varepsilon(t,\tau)}{\partial\tau} d\tau + \frac{\varepsilon(t,t_0)}{[1+\varphi f(t-t_0)]}. \quad (4)$$

Таким образом, уравнение состояния теории упруго-ползучего тела, наиболее точной из существующих на сегодня, но и наиболее трудоемкой в практическом использовании,

без потери ее положительных свойств, сведено по форме к уравнению нестареющего бетона (3) с его простотой в практическом применении. Уравнения (3), (4) в практически важных случаях разрешаются в элементарных функциях и замкнутом виде.

Последние опытные данные, полученные в НИИЖБ им. А. А. Гвоздева Е. Н. Паньковым при уровне напряжений, в соответствии с ГОСТ 24452 [2] и ГОСТ 24544 [3], равном 0,33 показывают, что упругие деформации наряду с известным свойством нелинейности [1] рассеивают энергию. Это отчетливо видно на рис. 1. График (рис. 1) построен для начального нагружения призмы за 30 секунд до уровня 0,33 от ее прочности, выдержки на этом уровне 24 минуты и сбросе всей нагрузки в течение 22 секунд.

На графике (рис. 2) отдельно показано развитие упругих деформаций, из которого видно, что в интервале времени 14–58 секунд упругие деформации симметричны относительно максимума, что свидетельствует об их обратимости на этом интервале.

Вне его они необратимы. Коэффициент необратимости равен 4E-05/3.6E-04 = 0,11.

Рассеивают энергию и деформации ползучести. Это также известный факт. Вопрос только в ее количестве. Если в существующих теориях оно оценивается около 20 %, то, по данным Е. Н. Панькова, составляет больше половины (см. следующие графики – рис. 3, 4).

График на рис. 4 показывает, что коэффициент необратимости постоянен во времени. Это свидетельствует об аффинноподобии кривых мер полных, обратимых и необратимых деформаций. А это, в свою очередь, «приводит к весьма важному в практическом отношении следствию о возможности инвариантного учета основных факторов, влияющих на изменение частных деформаций» [4]. Из сопоставления графиков видно, что в рассматриваемом опыте необратимость упругих деформаций почти в пять раз меньше необратимости деформаций ползучести.

Подавляющее большинство известных в научной литературе о железобетоне сведений о характере кривых ползучести в области надежной работы конструкций свидетельствуют

Рис. 1. Развитие деформаций в уровнях 0–0,33–0
Fig. 1. Development of strain at 0–0, 33–0

Рис. 2. Развитие упругих деформаций
Fig. 2. Development of elastic strain

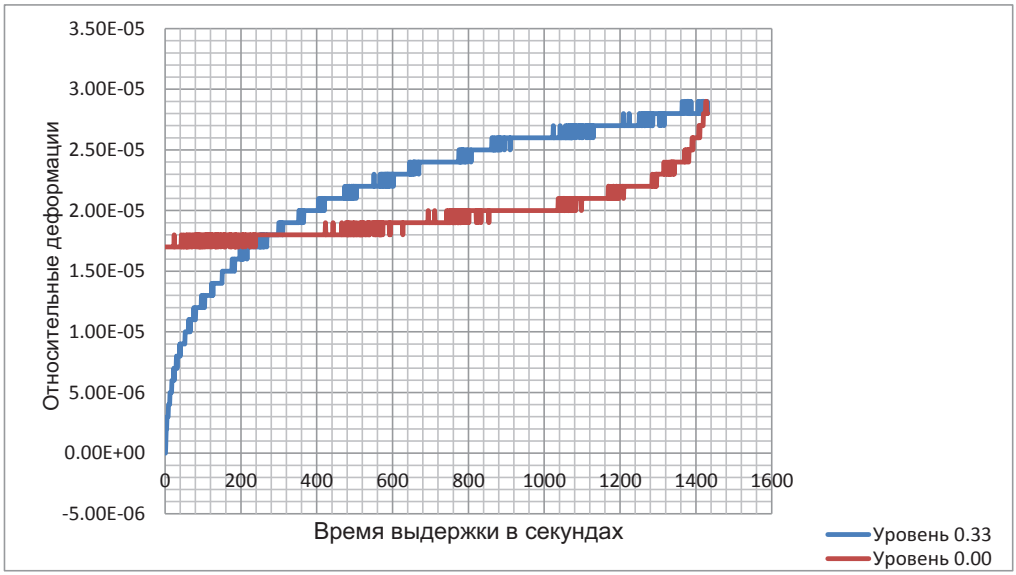


Рис. 3. Ползучесть на уровнях 0,33–0
Fig. 3. Creep at 0.33–0

об их гладкости и непрерывности. Это дает основание для распространения данных, полученных при кратковременных испытаниях, на весь временной интервал, открывая возможность экспресс-анализа дерформативных свойств бетона.

В заключение этой части отмечаем, что рассмотренный эксперимент дает качественную информацию. Количественную оценку можно получить, проведя необходимое количество воспроизведений опыта.

Рис. 4. Коэффициент необратимости деформаций ползучести на уровне напряжения 0,33
Fig. 4. Irreversibility coefficient of creep strain at 0.33 stress

При построении нелинейной теории следует всего лишь в (1) уровень напряжения η(τ) помножить на функцию нелинейности. В связи с этим приводим цитату В. М. Бондаренко: «В литературе приводится множество различных записей для функции нелинейности; каждый раз введение новых предложений мотивируется какими-нибудь локальными причинами; среди них обычно фигурируют соображения точности аппроксимации экспериментальных данных, хотя чаще всего достоверность ожидаемой точности не доказывается» [5]. Анализ этих предложений выявил предпочтительные, которые в итоге и были заложены в «Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. НИИЖБ, 1988» [6]. С учетом результатов [7–9], принимая усредненную функцию нелинейности,

$$S^0(\eta(\tau)) = [1 + v(\eta(\tau))^m], \tag{5}$$

получим нелинейную связь деформации при постоянном уровне напряжения

$$\varepsilon(t,\tau) = \eta(\tau)\varepsilon_R[1 + \varphi f(t-\tau)] + \left(\frac{\sigma(t)}{R(t)}\right)^{m+1} v\varepsilon_R[1 + \varphi f(t-\tau)], \tag{6}$$

где $\varphi = E(28)C(\infty,28)$;

v и m – параметры нелинейности.

Первое слагаемое в (6) представляет величину обратимых (потенциальных) деформаций, второе выражает величину необратимых омертвленных (диссипативных) деформаций, которые накапливаются достаточно быстро. По данным К. З. Галустова – за 40–50 суток, по данным В. В. Соломонова – за 5 суток. Предпосылка о том, что нелинейная часть (6) необратима, признается в научной литературе, однако в [7, 10] полагается, что она необратима частично, в [11] – необратима полностью, в [12] утверждается, что [7, 10, 11] не дают строгого аналитического решения уравнения при отыскании необратимой деформации и неприемлемы при решении релаксационной задачи. Заметим, что собственные публикации, на которые ссылается [12], заканчиваются в 1986 году.

Позднее А. А. Котов, опираясь на исследования В. Д. Харлаба (1981, 1983, 1996 гг.), фактически принимая основной принцип двухкомпонентной теории ползучести, говорит: «Естественным с физической точки зрения выглядит изначальное разделение процессов ползучести на обратимые и необратимые. Отсюда начальный постулат о структуре деформации ползучести предлагается формулировать так: полная деформация складывается из мгновенно упругой и деформаций, развивающихся во времени: полностью обратимой и полностью необратимой. Обратимая деформация является результатом вязкого течения материала, происходящего без нарушения структурных связей, определяющих потенциальную прочность материала, и поэтому обратима. Необратимая деформация отражает процесс постепенного разрушения этих связей под воздействием напряжений и поэтому необратима. Обратимая деформация ползучести не может быть ничем иным, как наследственно упругой деформацией, соответствующей принципу суперпозиции Больцмана – Вольтерра (обратимость гарантируется наследственной упругостью, а наследственная упругость предполагает линейность» [8].

Из этого непосредственно следует, что необратимые деформации равны разности общих и линейной частей деформаций, а это и есть нелинейная часть деформаций согласно (6). Приведенный выше обзор исследований показывает необходимость дополнительной экспериментальной проверки. Согласно [12], величина необратимых деформаций определяется максимальным уровнем напряжения с учетом всех сочетаний нагрузок в интервале τ, t. Уравнение (6) позволяет способом, используемым в линейной постановке, построить уравнения деформаций и релаксации при переменном уровне напряжений или вынужденных деформаций.

За исследованиями этого направления можно обратиться к [9] и там увидеть, что потребуется иметь режимы нагружений, которых, как известно, великое множество и которые не содержатся пока в действующих нормах. Как говорил Д. Пойа: «Пока никто не достиг Полярной звезды, но многие, глядя на нее, находили правильный путь». Один из путей можно найти, если интегрирование заменить простой суммой. Число членов в той сумме невелико. Согласно действующим нормам, в большинстве случаев нагрузки делятся на постоянные, временные длительные и временные кратковременные. Поэтому в функции $f(t-\tau) = 1 - ke^{-\gamma(t-\tau)}$ для обратимых деформаций аргумент можно принять равным бесконечности для первых и вторых видов нагрузок, нулю – для третьего вида и для необратимой части деформаций.

Список литературы

1. *Назаренко В.Г., Звездов А.И., Ларионов Е.А.* Некоторые соображения о построении современной теории расчета железобетонных конструкций. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;35(4):80–87. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-80-87

2. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призменной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. Москва: Стандартинформ; 2005.

3. ГОСТ 24544-81. Бетоны. Методы определения деформаций усадки и ползучести [интернет]. Режим доступа: https://gostrf.com/normadata/1/4294853/4294853100.pdf ГОСТ отменен. Новый: ГОСТ 24544-2020 https://gostassistent.ru/doc/11cdb233-16b3-42f5-a5a2-eb600f3edcf7

4. *Бондаренко В.М., Бондаренко С.В.* Инженерные методы нелинейной теории железобетона. Москва: Стройиздат; 1982.

5. *Бондаренко В.М.* Диалектика механики железобетона. Бетон и железобетон. 2002;(1):24–27.

6. НИИЖБ Госстроя СССР. Рекомендации по учету ползучести и усадки бетона при расчете бетонных и железобетонных конструкций. Москва: Стройиздат; 1988. 120 с.
7. *Александровский С.В., Попкова О.М.* Исследование нелинейных деформаций бетона молодого возраста при ступенчато изменяющихся напряжениях сжатия. В: Ползучесть и усадка бетона. Материалы Совещания, Киев, 1969 г. Москва: Стройиздат; 1969, с. 30–52.
8. *Котов А.А.* К теории ползучести и длительной прочности бетона. Вестник МГТУ. Труды Мурманского государственного технического университета. 2002;5(2):161–166.
9. *Барашиков А.Я.* Исследование длительной работы железобетонных конструкций при переменных нагрузках [диссертация]. Киев; 1978.
10. *Колесников Н.А.* Исследование нелинейной ползучести и релаксации напряжений в бетоне при повторных воздействиях напряжений или деформаций сжатия [диссертация]. Москва; 1970.
11. *Соломонов В.В.* Исследование предшествующего процесса деформирования на линейные и нелинейные деформации ползучести бетона при постоянных и переменных напряжениях сжатия [диссертация]. Москва; 1973.
12. *Галустов К.З.* Нелинейная теория ползучести бетона и расчет железобетонных конструкций. Москва: Физматлит; 2006.
13. *Назаренко В.Г.* Развитие основ теории расчета железобетонных конструкций с учетом особенностей режимного нагружения [диссертация]. Москва; 1990.
14. *Бондаренко С.В., Назаренко В.Г.* Методика теории ползучести. Москва: ВЗИСИ; 1981.

References

1. *Nazarenko V.G., Zvezdov A.I., Larionov E.A.* Calculation of reinforced concrete structures: considerations on developing new theory. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;35(4):80–87. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-80-87
2. State Standard 24452-80. Concretes. Methods of prismatic, compressive strength, modulus of elasticity and Poisson's ratio determination. Moscow: Standartinform; 2005. (In Russian).
3. State Standard 24544-81. Concretes. Methods of shrinkage and creep flow determination [internet]. Available at: https://gostrf.com/normadata/1/4294853/4294853100.pdf (in Russian).
4. *Bondarenko V.M., Bondarenko S.V.* Engineering methods of nonlinear theory of reinforced concrete. Moscow: Stroiizdat Publ.; 1982. (In Russian).
5. *Bondarenko V.M.* Dialectics of reinforced concrete mechanics. Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2002;(1):24–27. (In Russian).
6. NIIZHB Gosstroy of the USSR. Recommendations on accounting for creep and shrinkage of concrete when calculating concrete and reinforced concrete structures. Moscow: Stroyizdat; 1988. 120 p.
7. *Alexandrovsky S.V., Popkova O.M.* Investigation of nonlinear deformations of young concrete under stepwise varying compression stresses. In: Creep and shrinkage of concrete. Materials of the Meeting, Kiev, 1969. Moscow: Stroyizdat; 1969, pp. 30–52. (In Russian).
8. *Kotov A.A.* On the theory of creep and long-term strength of concrete. Vestnik MGTU. Trudy Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Vestnik of MSTU. 2002;5(2):161–166. (In Russian).
9. *Barashikov A.Ya.* Investigation of long-term operation of reinforced concrete structures under variable loads [dissertation]. Kyiv; 1978. (In Russian).
10. *Kolesnikov N.A.* Investigation of nonlinear creep and stress relaxation in concrete under repeated effects of stress or compression deformations [dissertation]. Moscow; 1970. (In Russian).
11. *Solomonov V.V.* Investigation of the previous deformation process on linear and nonlinear creep deformations of concrete under constant and variable compression stresses [dissertation]. Moscow; 1973. (In Russian).
12. *Galustov K.Z.* Nonlinear theory of concrete creep and calculation of reinforced concrete structures. Moscow: Fizmatlit Publ.; 2006. (In Russian).
13. *Nazarenko V.G.* Development of the fundamentals of the theory of calculation of reinforced concrete structures taking into account the peculiarities of regime loading [dissertation]. Moscow; 1990. (In Russian).
14. *Bondarenko S.V., Nazarenko V.G.* Methodology of the theory of creep. Moscow: VZISI; 1981. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Виталий Григорьевич Назаренко, д-р техн. наук, профессор, АО «НИЦ «Строительство», Москва
Vitaly G. Nazarenko, Dr. Sci. (Engineering), Professor, JSC Research Center of Construction, Moscow

Андрей Иванович Звездов✉**,** д-р техн. наук, профессор, заместитель генерального директора по научной работе АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail.: zvezdov@list.ru
Andrey I. Zvezdov✉**,** Dr. Sci. (Engineering), Professor, Deputy General Director for Academic Affairs, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail.: zvezdov@list.ru

Евгений Алексеевич Ларионов, д-р техн. наук, профессор, АО «НИЦ «Строительство», Москва
Evgeny A. Larionov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, JSC Research Center of Construction, Moscow

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.072.2.014
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-46-61 EDN: MENACU

ОСОБЕННОСТИ МОНИТОРИНГА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НЕСУЩИХ КОНСТРУКЦИЙ СТАДИОНА «ЛУЖНИКИ» ПРИ РЕКОНСТРУКЦИИ

О.И. ПОНОМАРЕВ✉, канд. техн. наук
А.А. МИНАСЯН, канд. техн. наук
М.А. ЗАБЕГИН

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. В статье приводится информация о методах усиления конструкций, возведенных с применением кирпича и камня, а также о проведенном мониторинге за их деформативностью при реконструкции Большой спортивной арены «Лужники». Основное внимание уделено методам, обеспечивающим сохранение фасадной стены стадиона, возведенной с применением керамических пустотных камней.

Цель. Обеспечение надежности и устойчивости стены БСА при реконструкции стадиона, в частности при демонтаже каркаса и гребенки трибун.

Материалы и методы. Был проведен расчет деформативности (отклонения от вертикали) каркаса трибун на стадии его демонтажа и расчет устойчивости стен с учетом раскрепления каркаса стальными связями из прокатных профилей. При проведении расчета рассматривался участок стены на первом этапе демонтажа трибун, состоящий из нескольких секций пролетами по 6 метров. В качестве основных силовых факторов, оказывающих наиболее интенсивные воздействия на деформации фасадной стены, рассматривалась возможность аномальных ветровых воздействий.

Результаты. Проведенные расчеты показали, что ветровая нагрузка на систему «фасадная стена + 1 пролет каркаса трибун» приводит к увеличению растягивающих и сжимающих напряжений в несущих элементах не более чем на 5–7 % по сравнению с системой «фасадная стена + 2 пролета каркаса трибун». На основании выполненных расчетов было принято решение о сохранении только одного пролета каркаса трибун, примыкающего к фасадной стене. Мониторинг за деформациями конструкций подтвердил надежность и эффективность принятых решений по усилению сохраняемых конструкций.

Выводы. Показано, что научно-техническое сопровождение проектирования и реконструкции БСА «Лужники» позволило обеспечить решение сложных задач, возникавших в процессе работ по реконструкции. Принципы реконструкции арены могут быть использованы на других аналогичных объектах.

Ключевые слова: фасадная стена, покрытие, усиление, мониторинг, надежность, реконструкция, ветровые нагрузки, керамические камни, деформативность

Для цитирования: Пономарев О.И., Минасян А.А., Забегин М.А. Особенности мониторинга технического состояния несущих конструкций стадиона «Лужники» при реконструкции. *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2023;38(3):46–61. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-46-61

Вклад авторов
Пономарев О.И. – подготовка статьи, наблюдение за деформациями конструкций.
Минасян А.А. – корректировка статьи, приборное оснащение, наблюдение за деформациями конструкций.
Забегин М.А. – корректировка статьи, проведение расчета ожидаемых деформаций конструкций.

Финансирование
Финансирование работ по мониторингу технического состояния несущих конструкций стадиона «Лужники» осуществлялось за счет бюджетных ассигнований.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 17.05.2023
Поступила после рецензирования 20.06.2023
Принята к публикации 27.06.2023

MONITORING THE TECHNICAL STATE OF LOAD-BEARING STRUCTURES OF THE LUZHNIKI STADIUM DURING RECONSTRUCTION

O.I. PONOMAREV✉, Cand. Sci. (Engineering)
A.A. MINASYAN, Cand. Sci. (Engineering)
M.A. ZABEGIN

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

Abstract

Introduction. The paper presents the methods of reinforcing brick-and-stone structures, as well as monitoring of their strain capacity during the reconstruction of the Grand Sports Arena of Luzhniki Olympic Complex. The authors paid special attention to the methods for ensuring the preservation of front wall made of ceramic hollow stones.

Aim. To ensure the reliability and stability of the wall of the Grand Sports Arena during the stadium reconstruction, in particular during the dismantling of the framework and stands.

Materials and methods. The authors calculated the strain capacity (vertical deviation) of the framework of the stands at its dismantling stage and the wall stability, taking into account the framework fastening with rolled steel braces. The wall section taken for calculation at the first stage of dismantling stands consisted of several spans of 6 meters each. An extreme wind action was considered as the main stress factor that has the most severe impact on the front wall strain.

Results. The calculations showed that the wind load on the system "front wall + 1 span of the stand framework" increases tensile and compressive stresses in the load-bearing elements by no more than 5–7% compared to the system "front wall + 2 spans of the stand framework". Based on the calculations performed, only one span of the stand framework adjacent to the front wall was decided to retain. Monitoring of the structures strain confirmed the reliability and efficiency of the adopted solutions to strengthen the retained structures.

Conclusion. Due to R&D support for the design and reconstruction of the Luzhniki Grand Sports Arena, complex issues arising in the process of reconstruction were efficiently solved. The principles of the Arena reconstruction can be applied to other similar facilities.

Keywords: front wall, coating, reinforcement, monitoring, reliability, reconstruction, wind loads, ceramic stones, strain capacity

For citation: Ponomarev O.I., Minasyan A.A., Zabegin M.A. Monitoring the technical state of load-bearing structures of the Luzhniki Stadium during reconstruction. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):46–61. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-46-61

Author contribution statements
Ponomarev O.I. – article draft preparation, observation of structures strain.
Minasyan A.A. – article draft editing, instrumentation, observation of structures strain.
Zabegin M.A. – article draft editing, calculation of the expected strain of structures.

Funding
Monitoring of the load-bearing structures of the Luzhniki Stadium obtained budget funding.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 17.05.2023
Revised 20.06.2023
Accepted 27.06.2023

Введение

В данной статье приводится информация о методах усиления конструкций, возведенных с применением кирпича и камня, а также о проведенном мониторинге их деформативности при реконструкции БСА «Лужники». Основное внимание уделено методам, обеспечивающим сохранение фасадной стены стадиона, возведенной с применением керамических пустотных камней.

Решение о строительстве Большой спортивной арены и других объектов спортивного комплекса «Лужники» было принято за два года до Спартакиады народов СССР 1956 г. Несмотря на большую сложность при проектировании и строительстве, основные объекты были введены в эксплуатацию точно к намеченному сроку – Спартакиаде народов СССР 1956 года. На рис. 1 можно видеть, что в декабре 1955 года было завершено возведение нулевого цикла и каркаса трибун.

В дальнейшем реконструкция БСА проводилась примерно через каждые 20 лет: к Олимпиаде 1980 г., затем к финальному матчу последнего турнира за Кубок обладателей кубков УЕФА 1998–1999 гг.; (матч между Пармой и Марселем прошел 12 мая 1999 г. в Лужниках и закончился со счетом 3:0 в пользу Пармы).

Третья, наиболее масштабная реконструкция прошла в 2013–2017 годах и была приурочена к чемпионату мира по футболу 2018 года.

Необходимо отметить, что перед проведением последней реконструкции БСА многие специалисты высказывали мнение о необходимости сноса практически всех несущих и ограждающих конструкций, включая большепролетное светопрозрачное покрытие.

Что касается гребенки и каркаса трибун, то их демонтаж не вызывал сомнений, так как в течение почти 40 лет эти конструкции не были защищены от атмосферных осадков, которые способствовали коррозии металла и бетона. Такая ситуация при наличии динамических и даже огневых воздействий (рис. 2, 3), создаваемых болельщиками при проведении футбольных матчей и зрителями при проведении концертов рок-групп, приводила к значительному ухудшению технического состояния конструкций трибун.

Большая дискуссия разгорелась относительно целесообразности сноса покрытия и фасадной стены, которая была возведена с использованием кладки из керамического камня с внутренним металлическим каркасом.

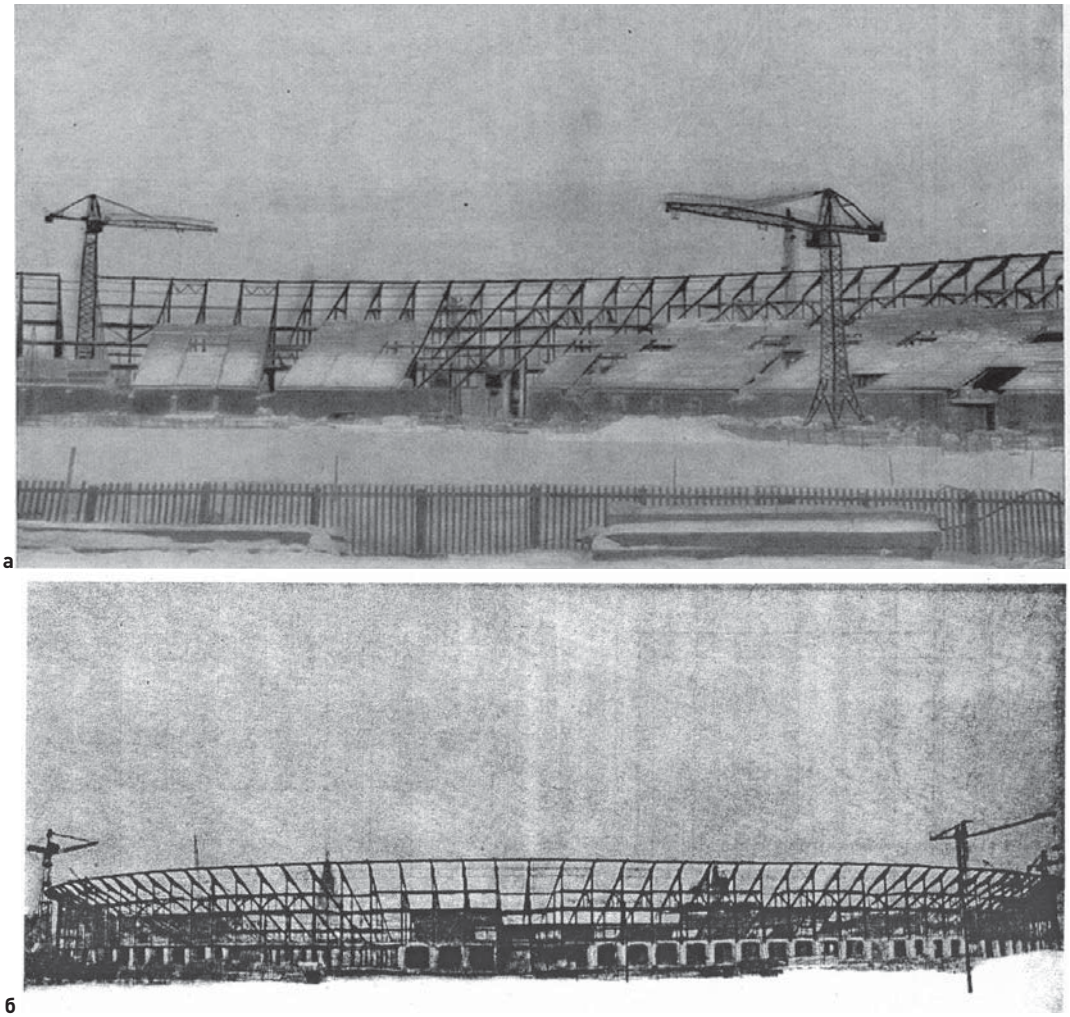


Рис. 1. Декабрь 1955 г. Строительство большой спортивной арены: *а* – вид со стороны футбольного поля; *б* – вид с внешней стороны
Fig. 1. December, 1955. Construction of the Grand Sports Arena: *а* – view from the football field; *б* – view from the outside

О работах по научно-техническому сопровождению, проектированию, монтажу и реконструкции большепролетного светопрозрачного покрытия БСА подробно изложено в статьях И.И. Ведякова и М.И. Фарфеля [1, 2].

В данной публикации изложена информация о конструкции стены, проведенных расчетах ее устойчивости и деформативности при различных вариантах сохранения колонн и ригелей (1 или 2 пролета). Описаны также этапы и характер работ по мониторингу технического состояния фасадной стены при демонтаже трибун.

Рис. 2. Вид на трибуны в момент создания максимального динамического вертикального воздействия
Fig. 2. View of the stands under maximum vertical dynamic pressure

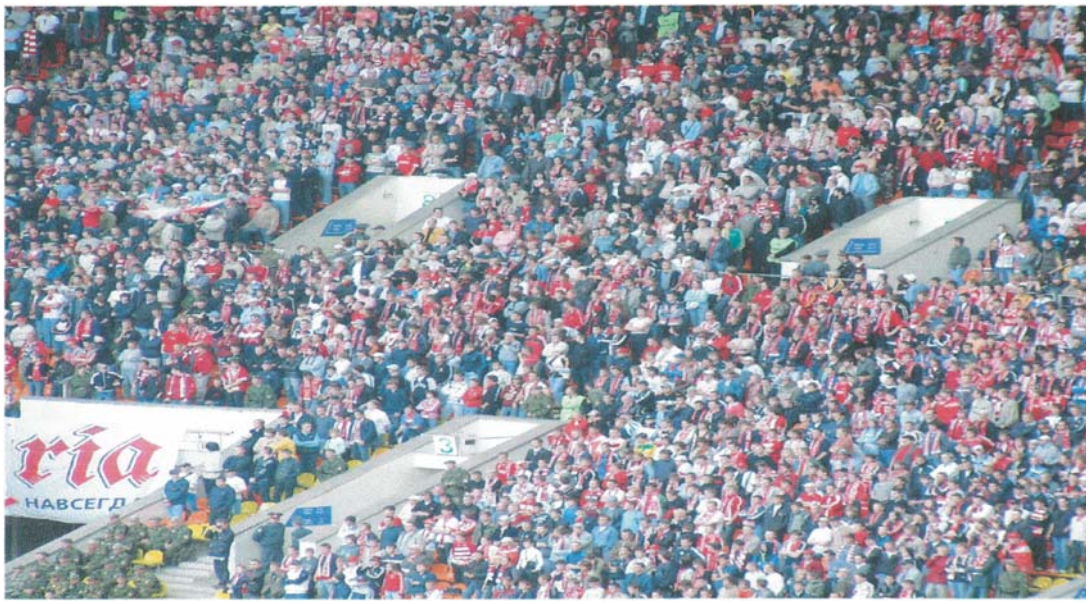


Рис. 3. Вид на трибуны при раскачивании зрителей, создающих горизонтальное динамическое воздействие на конструкции трибун
Fig. 3. View of the stands when the spectators are swaying, thus creating horizontal dynamic pressure on the structures

Конструкция фасадной стены БСА и мероприятия по ее сохранению при демонтаже трибун

Фундамент фасадной стены по оси 10 – железобетонные рандбалки с опиранием на столбчатые фундаменты. Столбчатые фундаменты колонн монолитные, опираются на сборную фундаментную плиту. Столбчатые и нижние фундаментные плиты выполнены из монолитного железобетона. Глубина заложения столбчатых фундаментов наружных стен и фундаментов внутренних стен, несущих колонн от пола цокольного этажа: 2,370–2,75 м; в технических помещениях: 3,55–3,95 м. Разрез и фрагмент фасада наружной стены показаны на рис. 4 и 5.

Глубина залегания фундаментных балок наружных стен – 2,90 м; в технических помещениях – от 3,05 до 3,40 м.

Основной несущий каркас фасадной стены – стальные крестообразные колонны и ригели.

Крестообразные колонны (сварные) выполнены из листовой стали толщиной 18–20 мм, сечение – 200 × 200 × 18 мм и 240 × 240 × 20 мм (рис. 4, 5), ригели, установленные в четырех уровнях между колоннами, состоят из двух двутавров № 30.

Кладка наружной фасадной стены, выполненная из керамического семищелевого камня на цементно-песчаном растворе, является ненесущей конструкцией (заполнение плоского стального рамного каркаса). Облицовка выполнена из камней типа «фелзит» толщиной 100 мм. При ремонте лицевого слоя использовался пескобетон с декоративной отделкой «под камень». Толщина наружных стен переменная – от 680 до 700 мм с учетом слоя облицовки. Марка кирпича М75, марка раствора М50. Расчетное сопротивление кладки наружных стен сжатию в соответствии с СП 15.13330 «СНиП П-22-81* Каменные и армокаменные конструкции» [3], $R_{сж}$ = 1,2–1,3 МПа (12,0–13,0 кгс/см^2). С учетом длительной эксплуатации прочность кладки при сжатии $R_{сж}$ = 1,5 МПа (15,0 кгс/см^2).

Цокольная часть наружных стен высотой 2,35–2,45 м облицована натуральными базальтовыми камнями толщиной 120 мм. В наружной фасадной стене встроены стальные колонны каркаса из парных уголков: на первом этаже – 2L № 240 × 240 × 20 мм, на верхних этажах – 2L № 200 × 200 × 18 мм. Сварные стальные колонны совместно с ригелями из двух двутавров № 30 установлены в кольцевом направлении по оси фасадной стены и образуют плоский рамный каркас.

Разрез и фасад наружной стены представлены на рис. 4 и 5.

Для обеспечения надежности фасадной стены БСА и исключения ее отклонения и разрушения при демонтаже был проведен расчет каркаса трибун на стадии его демонтажа и расчет устойчивости стен с учетом раскрепления каркаса стальными связями из прокатных профилей.

При проведении расчета рассматривался участок стены на первом этапе демонтажа трибун, состоящий из 6 или 9 секций пролетами по 6 метров.

В качестве основных силовых факторов, оказывающих наиболее интенсивные воздействия на деформации фасадной стены, рассматривалась возможность аномальных ветровых воздействий, имевших место в Москве и МО.

Проведенные расчеты показали, что ветровая нагрузка на систему «фасадная стена + 1 пролет каркаса трибун» приводит к увеличению растягивающих и сжимающих напряжений в несущих элементах не более чем на 5–7 % по сравнению с системой «фасадная стена + 2 пролета каркаса трибун».

На рис. 6 показан общий вид расчетной схемы «фасадная стена + 2 пролета каркаса трибун» с усиленными диагональными стальными связями при расчете перемещений от постоянных и длительных действующих нагрузок.

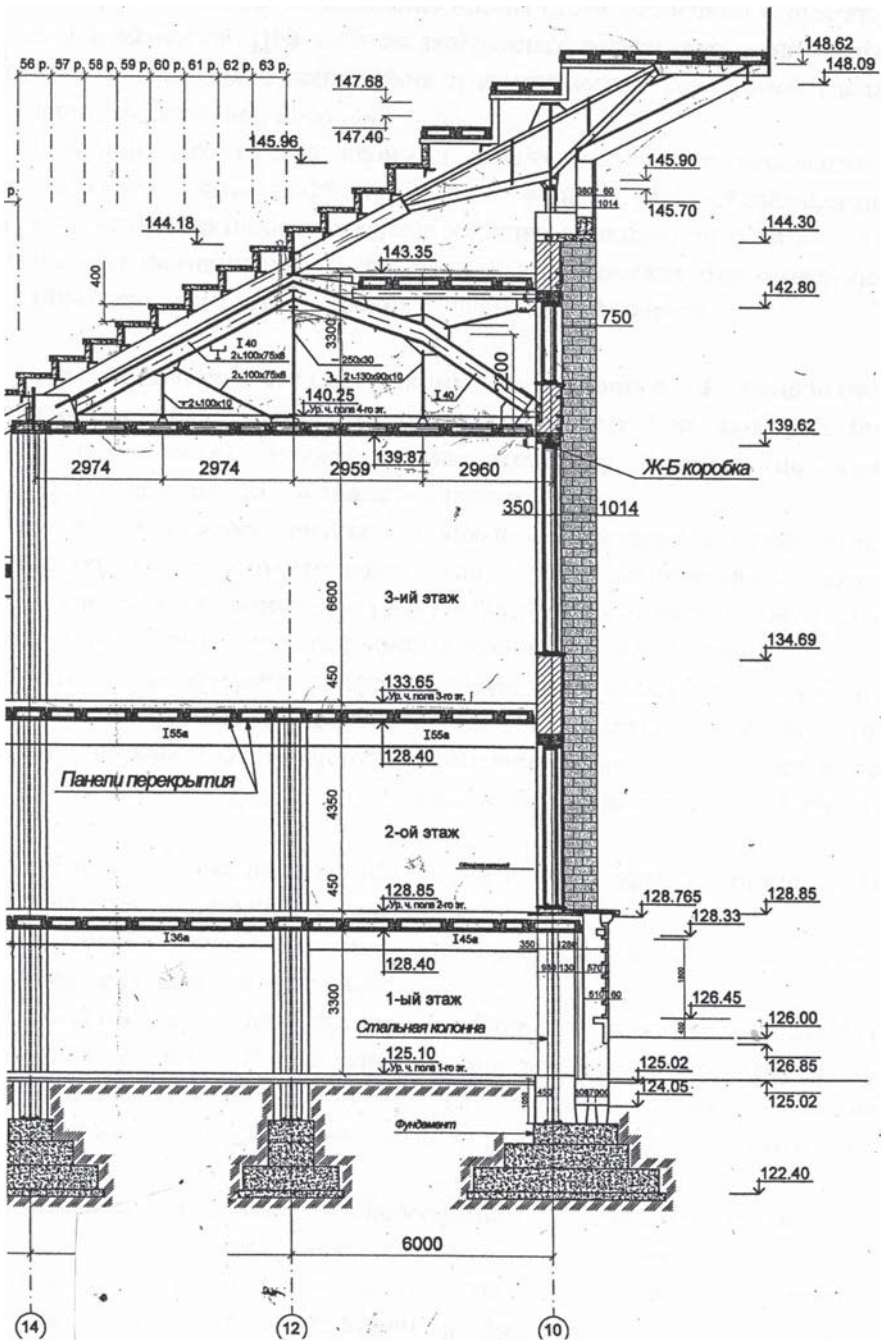


Рис. 4. Разрез (подтрибунные помещения и фасадная стена). Фрагмент
Fig. 4. Section (under-stand rooms and front wall). Fragment

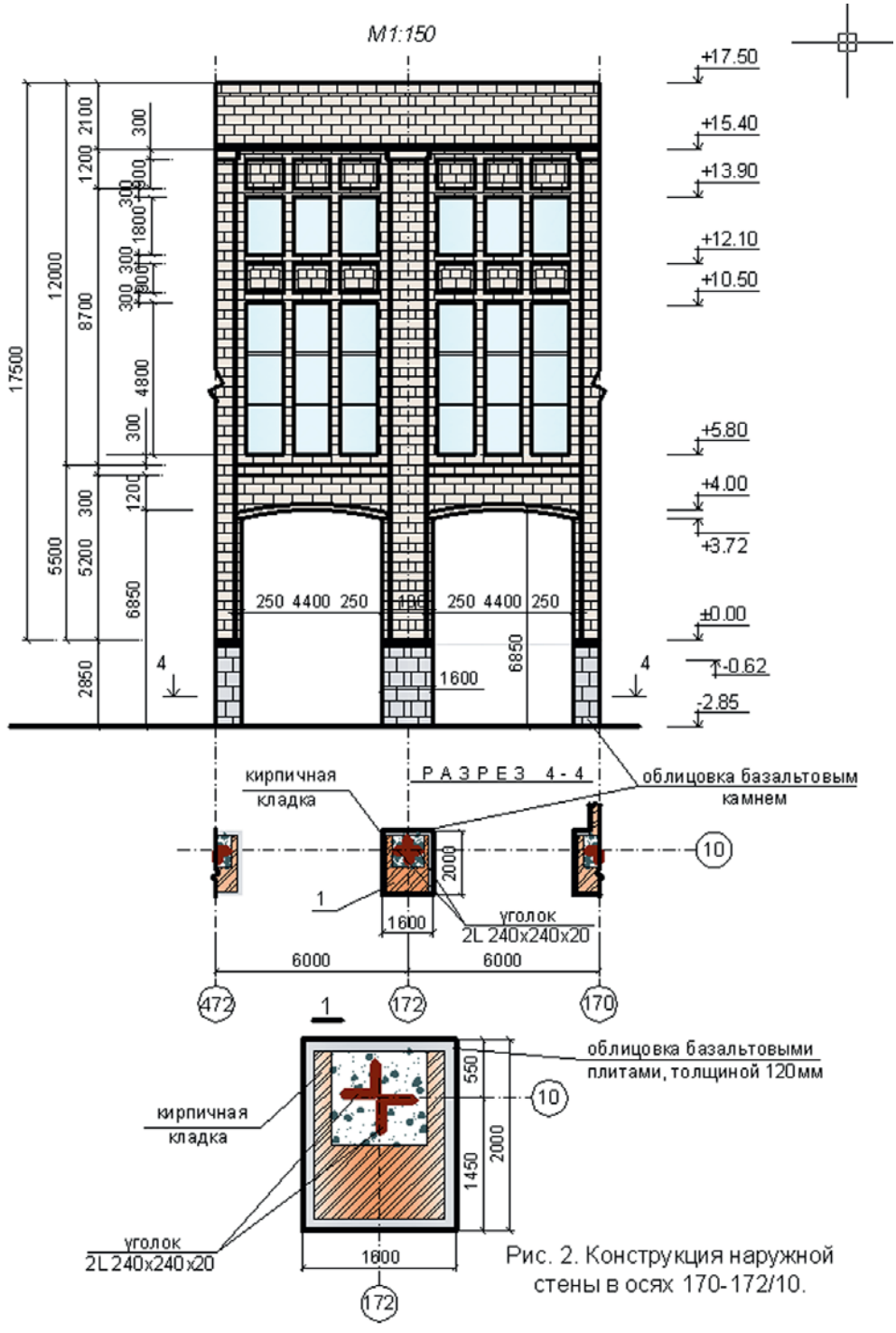


Рис. 5. Фрагмент фасада
Fig. 5. Fragment of the facade

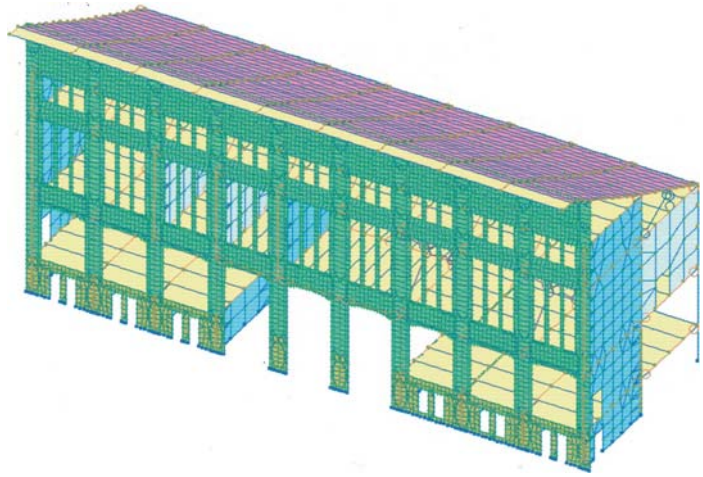


Рис. 6. Общий вид расчетной схемы БСА между осями 10–14/366–264 (в центре въезд на стадион) с усилением конструкций вертикальными стальными связями между осями 10–12. Расчет перемещения от постоянных и длительно действующих нагрузок конструкции пола и перегородок
Fig. 6. General view of the structural design of the Grand Sports Arena: axes 10–14/366–264 (entrance to the stadium in the center) with reinforcement of structures with vertical steel braces between axes 10–12. Analysis of the displacement caused by permanent and long-term acting loads of the floor and partition structures

На рис. 7 показана первая расчетная форма колебаний фрагмента системы «стена + 2 пролета каркаса трибун» от действий ветровых нагрузок.

На основании выполненных расчетов было принято решение о сохранении только одного пролета каркаса трибун, примыкающего к фасадной стене.

Такое решение обеспечило более высокие темпы производства работ по демонтажу металлического каркаса и железобетонной гребенки трибун. При этом были существенно снижены трудозатраты за счет применения механизации при демонтаже участка трибун в осях 12–14.

На рис. 8*а* (фото) показан фрагмент системы «фасадная стена + 1 пролет каркаса трибун» в осях 10–12. В соответствии с приведенным расчетом каркас усилен диагональными связями в радиальном и кольцевом направлениях.

Мониторинг технического состояния и деформаций фасадной стены при производстве работ по реконструкции БСА

Проведение наблюдений с точной регистрацией деформаций несущих конструкций сооружений, которая позволяет сделать оценку изменения напряжений в конструктивных элементах в условиях производства работ по демонтажу строительных конструкций, – достаточно сложная задача.

Строительные конструкции, на которых устанавливаются измерительные приборы при демонтажных работах, подвергаются интенсивным динамическим и механическим воздействиям. Кроме того, часть приборов и оснастки повреждается при производстве работ (рис. 9).

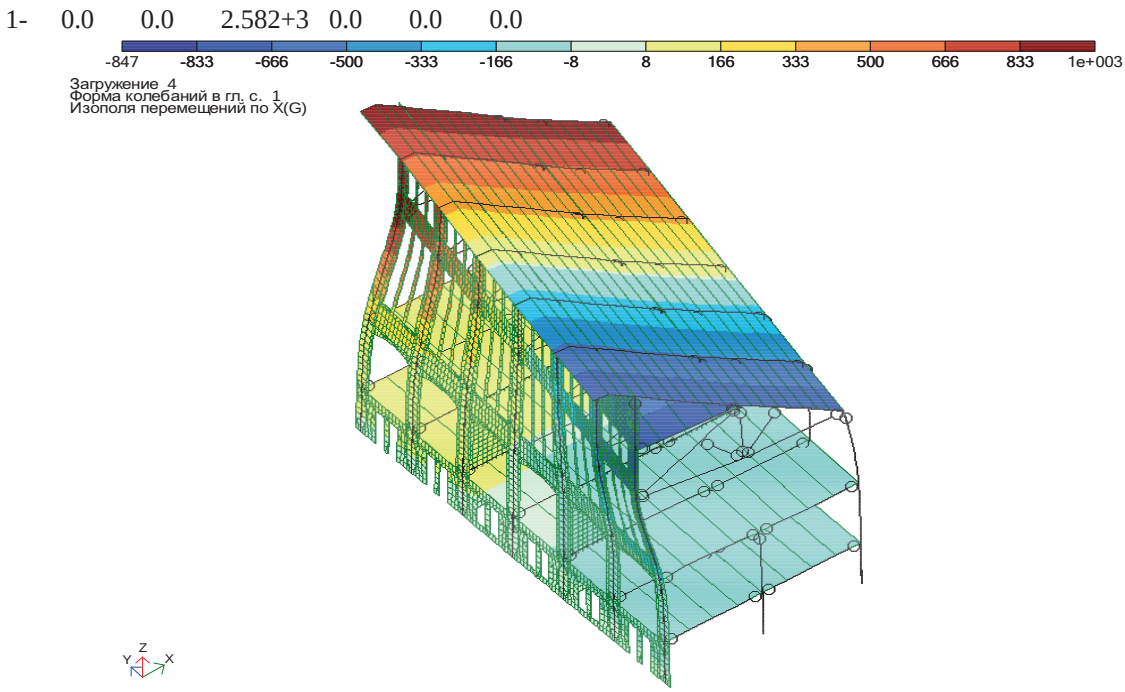


Рис. 7. Первая форма собственных колебаний системы
Fig. 7. The first mode of natural vibrations of the system

В связи с этим при выборе методики и средств для измерений деформаций и напряженного состояния в конструктивных элементах системы «фасадная стена + усиленный диагональными связями каркас трибун» были выбраны наиболее дешевые и надежные средства измерений.

Деформации (для определения напряжения) в основных конструктивных элементах и элементах усиления в наиболее ответственных узлах, стальных колоннах и диагональных связях усиления и сохраняемых конструкциях измерялись с помощью разработанных в ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко механических тензометров (деформометров) ТМИ-500М, включающих использование индикаторов часового типа ИЧ-10 (рис. 10).

Измерения температур для определения температурных поправок проводились электронным контактным термометром ТК5-01П отечественного производства.

Для определения напряженного состояния покрытия деформометры (тензометры) были установлены на следующих конструктивных элементах:

– на стойках, выполненных из 2L 140 × 12 высотой 6 м (деформометры были установлены на третьем этаже в осях 120/12; 218/12; 144/12; 242/12; 322/12; 342/12; 420/12);

– на диагональных связях из 2L 125 × 8 (деформометры установлены на третьем этаже в осях 120/12; 218/12; 144/12; 242/12; 322/12; 342/12; 420/12);

– на диагональных связях из 2L 1405 × 12 (деформометры установлены на втором этаже в осях 110; 210; 410).

а

б

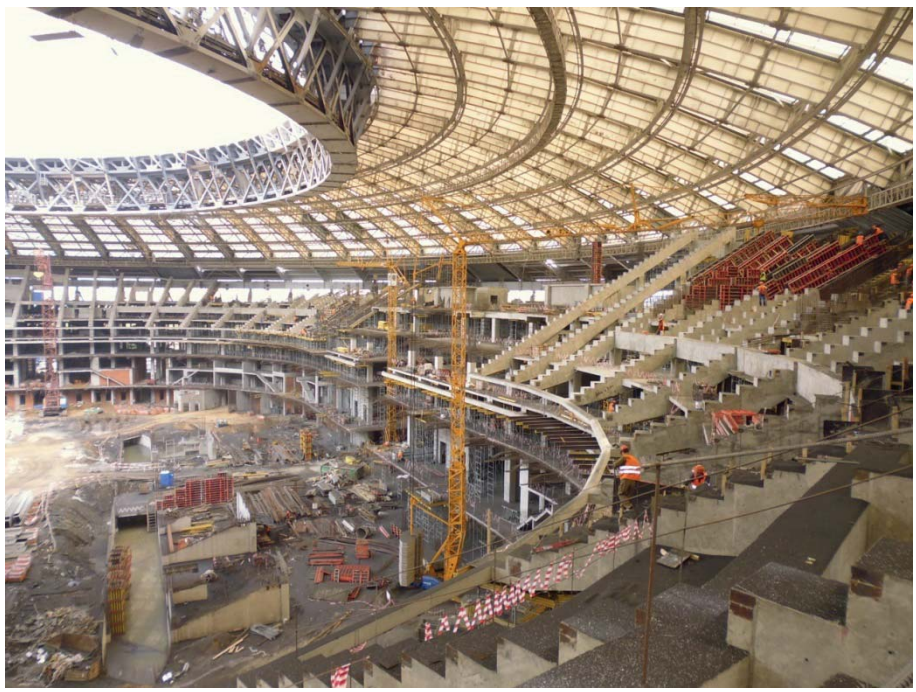


Рис. 8. *а* – фрагмент системы с усилением «фасадная стена + 1 пролет каркаса трибун, усиленный связями»; *б* – фрагмент этапа демонтажа трибун

Fig. 8. *а* – fragment of the system with reinforcement "front wall + 1 span of the stand framework reinforced with braces"; *б* – fragment at the stand dismantling stage

Определение деформаций позволяет вычислить величины напряжений в зоне установки приборов.

Измерения деформаций проводились с учетом температурных поправок, которые вводятся для того, чтобы изменения температуры конструкции не оказывали влияния на длину штанги базы деформометра и контрольного калибра прибора.

Для определения деформаций и отклонения фасадной стены были установлены маяки и деформометры в зоне сопряжения с поперечными стенами в радиальном направлении, а также на имеющихся трещинах (рис. 11).

Результаты геодезических наблюдений за деформациями фасадной стены БСА «Лужники» показали, что за период март – июнь 2014 г. зафиксированы отклонения стены до 16 мм на отметке 143 (ось 454/10).

Максимальные показания деформометров составили 0,9–1,0 мм.

Наиболее напряженная ситуация при проведении мониторинга за деформациями фасадной стены возникла в июле 2014 года. Максимальные отклонения стен в этот период составляли 27 мм.

Основными причинами увеличения деформации фасадной стены были работы по подготовке основания под фундаментную плиту, а также температурные деформации. В результате проведенных работ существующие фундаменты оказались с внутренней стороны не заглублены в грунт. Это привело к разуплотнению грунта и крену фасадной стены.

Рис. 9. Деформометр, установленный на диагональной связи, выведен из строя (погнута штанга деформометра)
Fig. 9. Strain gauge installed on the diagonal brace is out of order (the rod is bent)

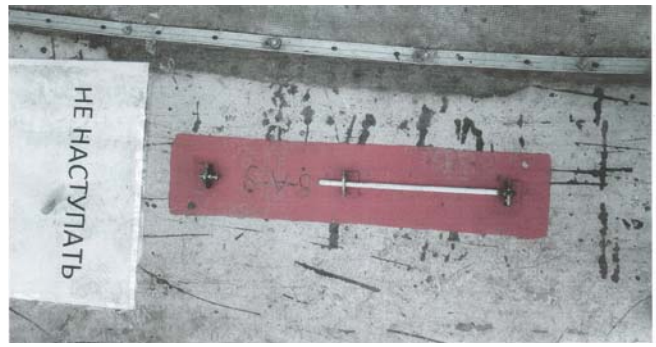


Рис. 10. Механический тензометр (деформометр) (ТМИ-500М)
Fig. 10. Mechanical strain gauge (TMI-500M)

Рис. 11. Контроль показаний деформометров
Fig. 11. Readings of strain gauges

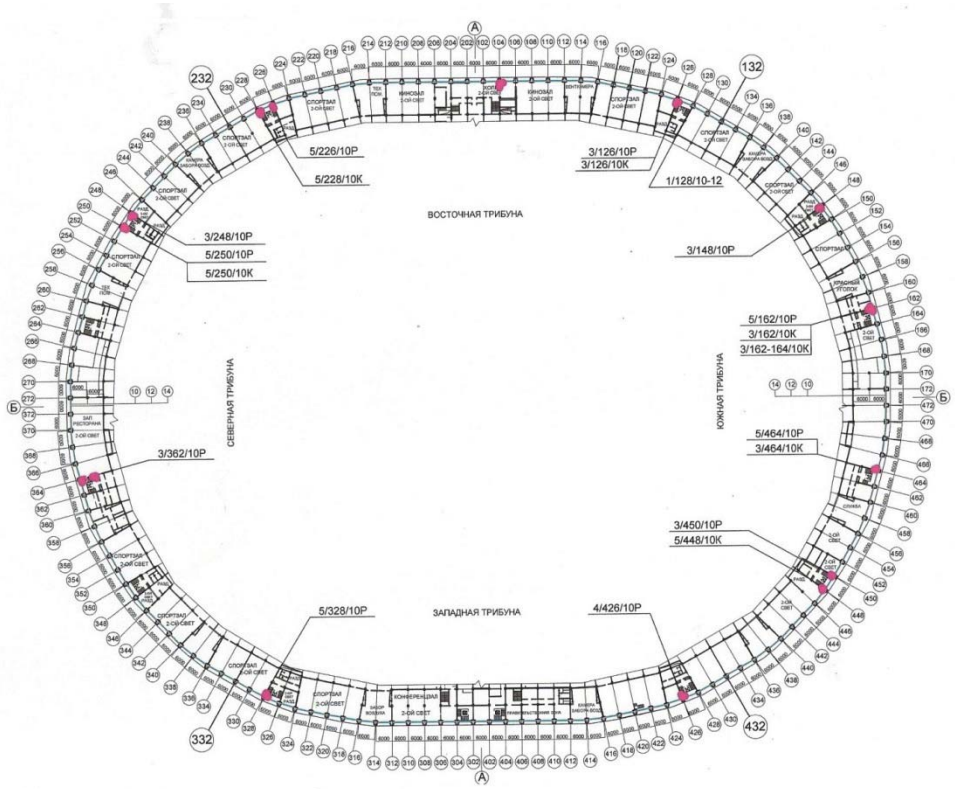


Рис. 12. Схема расположения деформометров для регистрации горизонтальных перемещений конструкций, примыкающих к наружной стене
Fig. 12. Layout of strain gauges for recording horizontal displacements of structures adjacent to the outer wall

Были приняты срочные меры по бетонированию фундаментной плиты в этой зоне. Бетонирование плиты основания по рекомендациям института выполнено захватками длиной не более 18 м. Бетонирование соседних захваток выполнялось не ранее чем через 4 дня. Одновременное бетонирование захваток допускалось с разрывом не менее чем через 72 м.

Выводы

Третья, наиболее масштабная реконструкция Большой спортивной арены олимпийского комплекса «Лужники» была завершена в 2017 году. На арене были проведены матчи восьмого и последнего турнира Кубка конфедерации среди национальных сборных под эгидой ФИФА. Турнир подтвердил полную готовность БСА к проведению главных матчей чемпионата мира 2018 г.

Научно-техническое сопровождение проектирования и реконструкции арены обеспечило решение самых сложных задач, возникавших в процессе проведения строительно-монтажных работ. Принципы реконструкции арены большой вместимости могут быть использованы при реконструкции других объектов.

Список литературы

1. *Фарфель М.И.* Обеспечение безаварийной эксплуатации уникального большепролетного покрытия Большой спортивной арены олимпийского стадиона «Лужники». Строительная механика и расчет сооружений. 2012;(6):56–61.

2. *Ведяков И.И., Фарфель М.И.* Научно-техническое сопровождение проектирования, изготовления и монтажа и эксплуатации при реконструкции Большой спортивной арены «Лужники» в г. Москве к Чемпионату мира по футболу в 2018 году. Вестник НИЦ «Строительство». 2019;(3):27–41.

3. СП 15.13330. Каменные и армокаменные конструкции. Актуализированная редакция СНиП 22-81* [интернет]. Режим доступа: http://stroy.adm44.ru/i/u/_15.13330.2012__II-22-81____2.pdf

4. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4) [интернет]. Режим доступа: https://tk-expert.ru/uploads/files/docs/%D0%A1%D0%9F%20%D0%9D%D0%90%D0%93%D0%A0%D0%A3%D0%97%D0%9A%D0%98%20%D0%92%D0%9E%D0%97%D0%94%D0%95%D0%99%D0%A1%D0%A2%D0%92%D0%98%D0%AF%20%D0%90%D0%9A%D0%A2%D0%A3%D0%90%D0%9B%D0%98%D0%97%D0%98%D0%A0%D0%9E%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%9D%D0%90%D0%AF%20%D0%A0%D0%95%D0%94%D0%90%D0%9A%D0%A6%D0%98%D0%AF%20%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9F%2002.01.07-85%20%D0%A1%D0%9F%2020.13330.2016%202022-05-30.pdf

5. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4 и № 5) [интернет]. Режим доступа: https://nostroy-sdo.ru/staticcontent/56.%20%D0%A1%D0%9F%2016.13330.2017%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8.%20%D0%90%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%9D%D0%B8%D0%9F%20II-23-81.pdf

6. *Микулин В.Б., Одесский П.Д., Лебедева И.В., Оспенников А.Г., Отставнов В.А., Попов Н.А. и др.* Покрытие Большой спортивной арены стадиона «Лужники» (проектирование, научные исследования и строительство). Москва: Фортэ; 1998.

7. *Фарфель М.И., Гукова М.И., Коняшин Д.Ю., Кущенко А.Е., Любарцев А.В.* Особенности реконструкции Большой спортивной арены стадиона «Лужники» к Чемпионату мира по футболу в 2018 году. Вестник НИЦ Строительство. 2017;(3):74–92.

8. *Микулин В.Б., Фарфель М.И., Ханджи А.В.* Покрытие Большой спортивной арены Олимпийского комплекса в Лужниках. В: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко 80 лет: сборник статей. Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; 2007, с. 46–55.
9. *Микулин В.Б., Попов Н.А., Отставнов В.А., Фарфель М.И.* Расчет покрытия Большой спортивной арены Олимпийского комплекса «Лужники». Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003;(6):38–42.

References

1. *Farfel M.I.* Ensuring trouble-free operation of the unique long-span covering of the Large sports arena of the Olympic stadium "Luzhniki". Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2012;(6):56–61. (In Russian).
2. *Vedyakov I.I., Farfel M.I.* Scientific and technical support of design, manufacture, installation and operation during the reconstruction of Grand Sports Arena "Luzhniki" in Moscow to the football World Cup in 2018. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2019;(3):27–41. (In Russian).
3. SP 15.13330. Masonry and reinforced masonry structures. Updated version of SNiP 22-81*. [internet]. Available at: http://stroy.adm44.ru/i/u/_15.13330.2012__II-22-81____2.pdf (in Russian).
4. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85* (with Changes No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4). [internet]. Available at: https://tk-expert.ru/uploads/files/docs/%D0%A1%D0%9F%20%D0%9D%D0%90%D0%93%D0%A0%D0%A3%D0%97%D0%9A%D0%98%20%D0%92%D0%9E%D0%97%D0%94%D0%95%D0%99%D0%A1%D0%A2%D0%92%D0%98%D0%AF%20%D0%90%D0%9A%D0%A2%D0%A3%D0%90%D0%9B%D0%98%D0%97%D0%98%D0%A0%D0%9E%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%9D%D0%90%D0%AF%20%D0%A0%D0%95%D0%94%D0%90%D0%9A%D0%A6%D0%98%D0%AF%20%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9F%2002.01.07-85%20%D0%A1%D0%9F%2020.13330.2016%202022-05-30.pdf (in Russian).
5. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81* (with Changes No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4 and No. 5) [internet]. Available at: https://nostroy-sdo.ru/staticcontent/56.%20%D0%A1%D0%9F%2016.13330.2017%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8.%20%D0%90%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%9D%D0%B8%D0%9F%20II-23-81.pdf (in Russian).
6. *Mikulin V.B., Odessky P.D., Lebedeva I.V., Ospennikov A.G., Retiring V.A., Popov N.A. et al.* Covering of the Large Sports Arena of the Luzhniki Stadium (design, research and construction). Moscow: Forte Publ.; 1998. (In Russian).
7. *Farfel M.I., Gukova M.I., Konyashin D.Yu., Kuschenko A.E., Lyubarsky A.V.* Particularities of the reconstruction of the Grand Arena of the stadium "Luzhniki" to the football World Cup in 2018. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2017; (3):74–92. (In Russian).
8. *Mikulin V.B., Farfel M.I., Khandzhi A.V.* Covering the Large sports arena of the Olympic Complex in Luzhniki. In: V.A. Koucherenko TSNIISK 80 years old. Collection of articles. Moscow: TSNIISK named after V.A. Koucherenko; 2007, pp. 46–55. (In Russian).
9. *Mikulin V.B., Popov N.A., Retignov V.A., Farfel M.I.* Calculation of the coverage of the Large sports arena of the Olympic complex "Luzhniki". Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety. 2003;(6):38–42. (In Russian).

Информация об авторах / information about the authors

Олег Иванович Пономарев✉**,** канд. техн. наук, заведующий лабораторией кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1701088@mail.ru
тел.: +7 (499) 170-10-59
Oleg I. Ponomarev✉**,** Cand. Sci (Engineering), Head of the Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 1701088@mail.ru
tel.: +7 (499) 170-10-59

Арман Арамаисович Минасян, канд. техн. наук, заведующий сектором железобетонных конструкций лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: 1747210@mail.ru
тел.: +7 (499) 174-77-94
Arman A. Minasyan, Cand. Sci (Engineering), Head of the Reinforced Concrete Structures Sector, Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: 1747210@mail.ru
tel.: +7 (499) 174-77-94

Михаил Анатольевич Забегин, заведующий сектором прочности крупнопанельных и блочных конструкций лаборатории кирпичных, блочных и панельных зданий ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: lerus2@mail.ru
тел.: 8 (926) 591-77-29
Mikhail A. Zabegin, Head of the Sector of Large-Panel and Block Structures Strength, Laboratory of Brick, Block and Panel Buildings, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: lerus2@mail.ru
tel.: 8 (926) 591-77-29

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 620.179.17
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-62-81 EDN: PGTEGQ

ТЕХНОЛОГИИ МОНИТОРИНГА БЕТОННЫХ И ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

А.И. САГАЙДАК, канд. техн. наук

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

Аннотация

Введение. Метод акустической эмиссии (АЭ) с успехом применяется для диагностики и мониторинга в различных отраслях: нефтегазовой, атомной, аэрокосмической промышленности, контроле процесса сварки, коррозии конструкций. При контроле железобетонных конструкций метод АЭ используется не так часто. Основная причина – отсутствие нормативных документов и конкретных методик контроля.

В 2021 году был выпущен ГОСТ Р 59938-2021 «Бетоны. Метод акустико-эмиссионного контроля». За последние несколько лет получены новые данные по эффективному применению метода акустической эмиссии по неразрушающему контролю и технической диагностики состояния строительных конструкций. В НИИЖБ им. А.А. Гвоздева проведены исследования на опытных образцах и фрагментах конструкций (железобетонных балках, бетонных образцах в виде плит, стеновых панелях и др.). Проводились исследования на конструкциях в условиях строительства Курской АЭС-2.

Цель работы: представить результаты разработанных в последнее время в АО «НИЦ «Строительство» методик технической диагностики и неразрушающего контроля бетонных и железобетонных конструкций методом АЭ.

Материалы и методы. Исследования проводились на бетонных и железобетонных образцах, изготовленных как из обычного (В15–В40), так и высокопрочного (В60–В100) бетонов. Ряд балок изготавливался из фибробетона. Конструкции испытывались в силовой установке. Исследования твердения бетонов методом АЭ проводились на бетонных смесях, изготовленных из тяжелого, мелкозернистого, цементного бетона с минеральными и химическими добавками. Твердение бетонов исследовалось дистанционно, с передачей данных по сети Wi-Fi.

Результаты. По результатам проведенного исследования разработаны технологии мониторинга и технической диагностики строящихся и эксплуатируемых конструкций методом акустической эмиссии.

Выводы. Приведенные акустико-эмиссионные технологии могут применяться для мониторинга и технической диагностики строящихся и эксплуатируемых конструкций. Эффект от реализации технологий в строительстве выразится в повышении безопасности и надежности строительных конструкций за счет внедрения технологий акустико-эмиссионного контроля.

Ключевые слова: акустическая эмиссия, бетонные и железобетонные конструкции, неразрушающий контроль твердения бетона, техническая диагностика

Для цитирования: Сагайдак А.И. Технологии мониторинга бетонных и железобетонных конструкций методом акустической эмиссии. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):62–81. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-62-81

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

Финансирование
Исследования частично финансировались ФАУ «ФЦС».

Конфликт интересов
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.05.2023
Поступила после рецензирования 21.06.2023
Принята к публикации 27.06.2023

TECHNOLOGIES FOR ACOUSTIC EMISSION MONITORING OF CONCRETE AND REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

A.I. SAGAIDAK, Cand. Sci. (Engineering)

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

Abstract

Introduction. The acoustic emission (AE) method is successfully used for diagnostics and monitoring in various industries including oil and gas, nuclear, aerospace as well as in welding processes and structural corrosion. However, inspection of reinforced concrete structures seldom involves the AE method. The main reason behind is the lack of regulatory documents and specific control procedures.

State Standard R 59938-2021 "Concretes. Acoustic emission testing method" was issued in 2021. Over the past few years, new data on effective application of the acoustic emission method for non-destructive testing and technical diagnostics of the building structures have been obtained. The studies were carried out on specimens and fragments of structures (reinforced concrete beams, concrete samples in the form of slabs, wall panels, etc.) in NIIZHB named after A.A. Gvozdev. The studies were conducted on the structures under construction at Kursk NPP-2.

Aim. To present the results of the recently developed methods of technical diagnostics and non-destructive AE testing of concrete and reinforced concrete structures.

Materials and methods. The investigations were carried out on concrete and reinforced concrete specimens made of both normal (B15–B40) and high-strength (B60–B100) concrete. A number of beams were made of fiber concrete. Structures were tested in the power unit. AE monitoring of concrete hardening involved concrete mixtures made of heavy, fine-grained, cement concrete with mineral and chemical additives. Concrete hardening was investigated remotely, with online data transmission.

Results. Based on the results of the conducted study, the technologies for acoustic emission monitoring and technical diagnostics of the structures under construction and in operation have been developed.

Conclusions. The given acoustic emission technologies can be used for monitoring and technical diagnostics of structures under construction and in operation. The implementation of technologies in construction will lead to the increase in safety and reliability of building structures due to the introduction of acoustic emission monitoring.

Keywords: acoustic emission, concrete and reinforced concrete structures, non-destructive testing of concrete hardening, technical diagnostics

For citation: Sagaidak A.I. Technologies for acoustic emission monitoring of concrete and reinforced concrete structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):62–81. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-62-81

Author contribution statement
The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding
A partial funding was provided by the FAU "FCC."
Conflict of interest
The author declares no conflict of interest

Received 15.05.2023
Revised 21.06.2023
Accepted 27.06.2023

Введение

Одним из методов мониторинга, технической диагностики и неразрушающего контроля является метод акустической эмиссии (АЭ), основанный на регистрации звуковых импульсных волн, излучаемых материалом конструкции при формировании ее структуры, при разрушении или в процессе коррозии. Современная аппаратура для регистрации АЭ изготавливается на базе цифровых технологий, она компактна, позволяет получать множество характеристик процесса АЭ как в реальном масштабе времени, так и при пост-экспериментальной обработке записанных данных. Сотрудники НИИЖБ имени А.А. Гвоздева работают в области неразрушающего контроля и технической диагностики более 15 лет, было разработано несколько технологий АЭ-контроля для бетонных и железобетонных конструкций [1–3]. Некоторые из этих технологий утверждены как национальный стандарт [4]. Разработаны и прошли апробацию следующие технологии АЭ-контроля:

– классификация развивающихся трещин в бетонных и железобетонных конструкциях;
– контроль степени повреждения в конструкции при помощи *b*-параметра;
– определение наступления предельного состояния строительных конструкций;
– оценка трещинообразования конструкций при помощи инвариантных критериев;
– оценка степени повреждения конструкций, основанная на применении циклического приложения нагрузки;
– АЭ-технология дистанционного контроля конструкций из железобетона;
– контроль прочности твердеющего бетона.

Применение указанных технологий позволяет получить достоверные данные о состоянии конструкций. Применение АЭ-технологий обеспечит максимальную экономию средств владельцам при проведении мониторинга зданий и сооружений.

Технология контроля и оценки повреждений в конструкции при помощи инвариантных критериев

В основе технологии предложен подход [5–7], заключающийся в том, что существует связь регистрируемых сигналов АЭ с физическим процессом разрушения, который определяется по отклонению от устойчивых (инвариантных) в силу ряда предельных теорем статистических распределений параметров АЭ. Проведенные исследования в металлах, композиционных материалах, бетонных и железобетонных конструкциях показали, что на начальных

стадиях деформирования (до образования трещин) временной поток АЭ событий является стационарным и описывается пуассоновским законом распределения. Как только в бетоне конструкции образуются дефекты или трещины, временный инвариант и амплитудный инвариант меняются и принимают численное значение, отличное от единицы или 0,1 соответственно. Тогда появление отклонений регистрируемых значений этих соотношений от их инвариантных значений может служить критерием перехода на следующую стадию деформации или разрушения.

По численным значениям временного инвариантного критерия $I\Delta t$ и амплитудного инвариантного критерия I_A по ранее установленной зависимости определяют суммарную длину трещин L в зоне контроля (зона контроля – область вокруг преобразователя АЭ, в пределах которой сигнал от имитатора Су-Нильсена регистрируется аппаратурой при заданном уровне порога).

Технология приведена в первой редакции разрабатываемого ГОСТ Р «Конструкции бетонные и железобетонные. Акустико-эмиссионный мониторинг». Контроль возможен одним преобразователем АЭ.

Технология контроля степени повреждения в конструкции при помощи *b*-параметра

Впервые метод анализа повреждений при помощи *b*-параметра (*b*-value) был предложен в сейсмологии в первой половине двадцатого века на основании формулы Гутенберга – Рихтера. В конце XX века формула была адаптирована для АЭ-метода и записана как:

$$log_{10}N = a - bA_{dB},$$

где A – амплитуда импульсов АЭ в дБ;

N – кумулятивное число импульсов АЭ с амплитудами больше A_{dB}.

Для анализа используется значение показателя *b,* который показывает угол наклона амплитудного распределения. Значения *b*-параметра для оценки степени повреждения задаются из предварительных испытаний на основании значения параметра и фактического состояния конструкции. Меньшим значениям *b*-параметра соответствует большая степень повреждения. В технологии приводится взаимосвязь между локальным изменением *b*-параметра и значениями АЭ-параметров, по которой устанавливается критерий разрушения конструкций при мониторинге конструкций.

Технология определения близости наступления предельного состояния строительных конструкций

Под предельным состоянием конструкции по АЭ-показаниям принимается состояние конструкции, при котором ее дальнейшее применение по назначению недопустимо или нецелесообразно. В основу технологии взят патент № 2417369 «Способ определения предельного состояния строительных конструкций» [8]. В статье приводятся алгоритм вычисления статистического параметра и методика определения близости наступления предельного состояния при помощи диагностической диаграммы.

Технология классификации развивающихся трещин в бетонных и железобетонных конструкциях

Впервые классификация развивающихся трещин методом АЭ была приведена в стандарте [9]. Результаты исследований показали, что при испытании балок вначале образуются микротрещины отрыва с коротким временем зарождения. При приближении к разрушению образуются преимущественно сдвиговые трещины с длительным временем зарождения по сравнению с трещинами отрыва.

Установлено, что параметры сигнала АЭ зависят от типа трещины. Сигналы от трещин отрыва являются более высокочастотными, тогда как сигналы от трещин сдвига – более низкочастотными.

В технологии приводится классификация трещин по двум параметрам:

– *RA*-значение – отношение времени нарастания сигнала АЭ к его амплитуде;

– средняя частота F_a – отношение числа выбросов в импульсе к его длительности.

Технология оценки степени повреждения конструкций, основанная на применении циклического приложения нагрузки

Предложен критерий оценки степени повреждения железобетонных конструкций, основанный на применении двух коэффициентов, связанных с эффектом Кайзера [3, 10].

Для оценки степени повреждений определены новые параметры АЭ – коэффициент нагрузки и коэффициент разгрузки. Обнаружено, что степень повреждения, оцененная на основе этих двух коэффициентов, хорошо согласуется с действительной степенью повреждения балок. Предложен метод количественной оценки степени повреждения находящихся в эксплуатации железобетонных сооружений [4], например мостов, эстакад и зданий, требующий лишь приложения циклической нагрузки и мониторинга активности АЭ.

Выбор преобразователей АЭ и их зона контроля

Расстояние, на котором возможно контролировать разрушение в конструкции методом АЭ, зависит от следующих факторов:

– армирование конструкции;

– прочность бетона и его возраст;

– тип бетона;

– фоновый шум, электромагнитные наводки;

– тип применяемого преобразователя АЭ.

При контроле строительных конструкций рекомендуется использовать преимущественно резонансные преобразователи, имеющие более высокую чувствительность по сравнению с широкополосными.

В ГОСТ Р 59938-21 «Бетоны. Акустико-эмиссионный метод контроля» [4] приводятся рекомендации по выбору преобразователей АЭ для контроля бетонных и железобетонных конструкций. Для бетонных и железобетонных конструкций рекомендуется применять:

– преобразователи АЭ с резонансной частотой 150 кГц для лабораторных измерений образцов небольших размеров, например 100 × 200 мм;

– преобразователи АЭ с резонансной частотой 60 кГц для АЭ измерений крупных образцов, например размерами 1000 × 1000 × 1000 мм;

– для сильно поврежденных конструкций допускается использовать акселерометры с резонансной частотой менее 20 кГц.

Ориентировочная зона контроля в бетоне конструкции одного преобразователя составляет 1,5–2,5 метра.

Технология контроля и прогноза прочности бетонов при твердении

При твердении бетона методом АЭ [11] регистрируются акустические сигналы, излучаемые структурой бетона при ее формировании. Метод АЭ является пассивным и позволяет контролировать прочность бетона в любом месте конструкции, на любой глубине, в труднодоступных местах, при этом геометрия конструкции не оказывает влияния.

Исследования показали, что контролировать прочность твердеющего бетона будет возможно в сильно армированных конструкциях не снимая опалубку, что расширяет область применения метода.

Установлено, что по изменению АЭ-параметров с течением времени можно выделить три временных интервала, характеризующихся различной степенью интенсивности АЭ, что отражается как в количестве регистрируемых импульсов, так и в значении их энергетических параметров [11].

Разработан алгоритм по прогнозированию прочности бетона методом АЭ. Время, необходимое для прогнозирования, не является фиксированным и для большинства составов не превышает 48 часов с момента бетонирования.

В качестве информативных параметров АЭ, коррелирующих с прочностью бетона в возрасте 28 суток, анализировались численные значения АЭ-параметров в пределах различных стадий и параметры их распределений:

– ΣE_{I} – суммарная энергия в течение периода I;
– ΣE_{III} – суммарная энергия в течение периода III;
– $E_{ср(I)}$ – средняя энергия в течение периода I;
– $E_{ср(III)}$ – средняя энергия в течение периода III;
– $q1_{E}$ – первый квартиль выборки энергий;
– $q3_{E}$ – третий квартиль выборки энергий;
– S_{E} – дисперсия выборки энергий;
– ΣA_{I} – суммарная амплитуда в течение периода I;
– ΣA_{III} – суммарная амплитуда в течение периода III;
– $A_{ср(I)}$ – средняя амплитуда в течение периода I;
– $A_{ср(III)}$ – средняя амплитуда в течение периода III;
– $q1_{A}$ – первый квартиль выборки амплитуд;
– $q3_{A}$ – третий квартиль выборки амплитуд;
– S_{A} – дисперсия выборки амплитуд.

Наиболее информативными параметрами оказались:

– Δt – длительность второго периода;

– $tg(\alpha_{I})$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для первого периода;

– $tg(\alpha_{III})$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для третьего периода.

Наблюдается хорошая корреляция между прочностными характеристиками и информативными параметрами АЭ-данных.

Коэффициент корреляции был не ниже 0,86; 0,84 и 0,81 для зависимостей (Δt), $tg(\alpha_{III})$ и $tg(\alpha_{I})$ от прочности бетона в возрасте 28 суток соответственно. Данные параметры могут быть использованы для построения множественной регрессионной модели. В этом случае точность прогноза возрастает.

Технология дистанционного контроля АЭ-методом строительных конструкций

Компания MISTRAS разработала беспроводной мультиканальный АЭ-узел (электронный блок), который связан с базовой станцией по стандартному радиоканалу. АЭ-узел – объединение 11 различных датчиков, включая один тензометр, 4 датчика АЭ, имеет 6 входов для датчиков внешних параметров (например, давление, температура, смещение и др.). АЭ-узел имеет встроенную память в виде SD-карты, передает по беспроводному каналу записанные данные через базовую станцию в анализирующий компьютер.

Беспроводной АЭ-узел представляет собой микрокомпьютер, который способен осуществлять мониторинг объекта контроля. Беспроводной АЭ-узел и антенна должны располагаться в местах, где имеется наименьшее количество объектов, закрывающих путь радиоволны до базовой станции. Базовая станция должна располагаться на достаточно близком расстоянии от всех датчиков, где она могла бы уверенно принимать их радиосигналы. Обычно это расстояние составляет 40–500 метров. Базовая станция соединяется с компьютером по каналу USB. Система имеет активную систему проверки датчиков (AST), основанную на излучении одним из датчиков импульсного сигнала, который принимается окружающими датчиками. Таким образом проверяется чувствительность датчиков в процессе работы, а также сравнивается чувствительность при установке системы в конце периода работы.

Беспроводной АЭ-узел был спроектирован с целью упростить и ускорить развертывание АЭ системы на небольших площадях, критичных с точки зрения потенциального разрушения.

В наших исследованиях при проведении мониторинга твердения бетонов использовался АЭ-комплекс с EthernetBox, в котором визуализация и обработка результатов производятся на удаленном рабочем месте оператора, подключенном к аппаратной части комплекса посредством сети Ethernet с помощью кабельного или беспроводного соединения. Данные о работе комплекса можно получать и обрабатывать на любом удалении от места установки датчиков. Программное обеспечение комплекса имеет возможность автоматической настройки порогового уровня отсечки шумов и других параметров сбора данных, что позволяет проводить АЭ-мониторинг без участия оператора. Сбор данных может быть организован также автоматически таким образом, чтобы комплекс формировал регулярные массивы данных за указанный промежуток времени. В начале каждой сессии сбора данных может быть включен специализированный режим самокалибровки комплекса для проверки его работоспособности и/или формирования картины «прозвучивания» области контроля с целью определения динамики параметра затухания и скорости звуковых волн заданного частотного диапазона в материале конструкции.

Дистанционный контроль применялся при проведении лабораторных исследований и в условиях строительной площадки [12].

Пример определения близости наступления аварийного состояния строительных конструкций

Рассматриваются результаты испытания шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Размер балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм.

Железобетонная балка армировалась двумя арматурными стержнями. Балка изготавливалась из напрягающего бетона класса по прочности на сжатие В45. Арматурные стержни располагались в нижней части балки. В качестве рабочей арматуры использовалась предварительно напряженная арматура класса A–V диаметром 16 мм. Усилие натяжения арматуры, с учетом всех потерь, составило 100 МПа. Акустический контакт между преобразователем АЭ и бетоном осуществлялся при помощи контактной смазки. Нагрузку к балкам прикладывали при помощи гидравлического домкрата и ручной насосной станции. Нагрузку от домкрата через жесткую распределительную траверсу прикладывали к балке сосредоточенно в двух точках. Режим приложения нагрузок был принят ступенчатым с малоцикловым повторным нагружением. Величина ступени нагружения составляла 10–15 % от разрушающей нагрузки P.

На каждой ступени нагружения регистрировались параметры импульсов АЭ.

Последовательность регистрируемых параметров импульсов АЭ дробилась на выборки. Длина выборки принималась 64 импульса.

На диаграмме (рис. 1), построенной по результатам испытания балки, численные значения импульсов АЭ располагались в зонах I, II и III. Зона I характерна для большинства

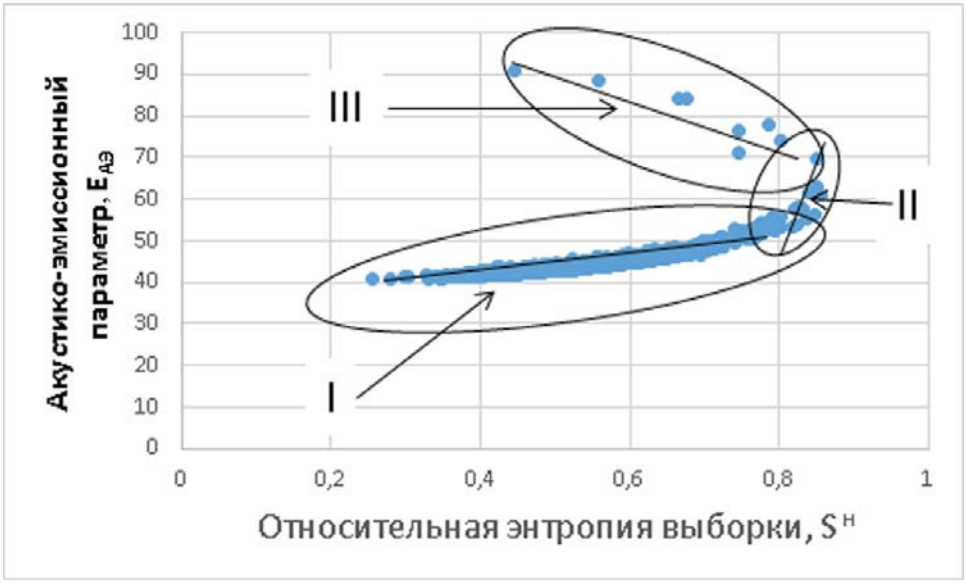


Рис. 1. Диагностическая диаграмма
Fig. 1. Diagnostic chart

этапов нагружения балки. Образование нормальных или наклонных силовых трещин с шириной раскрытия до 0,3–0,5 мм, увеличение прогиба балки существенно не видоизменяют характер расположения численных значений импульсов АЭ в зоне I. Перед разрушением (уровень напряжений в балке $s/R = 0{,}94$) появляется зона II. На этом этапе в конструкции появляются магистральные трещины, деформации балки нелинейно растут. Зона III соответствует предразрушающему состоянию, когда конструкция еще не разрушилась, но происходит дальнейший рост магистральных трещин, ширина раскрытия трещин превышает 0,5 мм, разрушается сжатая зона бетона, происходят дальнейшие деформации балки. Последовательный переход от зоны I к зоне II и затем к зоне III характеризуется изменением угла наклона прямой линейной зависимости, при помощи которой происходит аппроксимация численных значений импульсов АЭ в зоне I, зоне II, зоне III.

Коэффициент наклона прямой линейной зависимости меняет свои численные значения от положительных значений (зона I и зона II) на отрицательные (зона III), при этом угол наклона линейной зависимости меняется на 90° и более по сравнению с зоной I.

О наступлении предельного состояния конструкции судят по изменению угла наклона линейной зависимости на 90° и более. Дальнейшая эксплуатация конструкции при данном уровне нагружения приведет к ее разрушению.

Пример оценки состояния конструкций на основе *b*-параметра

Рассматриваются результаты контроля образования трещин при испытании шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Размер балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм. Балка изготовлена из бетона по прочности на сжатие В90. Балка армирована тремя арматурными стержнями диаметром 14 мм в нижнем сечении, двумя арматурными стержнями диаметром 10 мм в среднем сечении и двумя арматурными стержнями диаметром 14 мм в верхнем сечении. Режим приложения нагрузки к балке – ступенчатый. Балку доводили до разрушения.

Для измерения АЭ использовались преобразователями АЭ с рабочей полосой частот от 30 до 300 кГц. Порог был установлен 40 дБ. Этот порог позволил устранить фоновый шум и зафиксировать АЭ при трещинообразовании. Преобразователи АЭ крепились с двух сторон на боковые поверхности балки. На каждой ступени нагружения проводили измерения прогиба балки, длины и ширины раскрытия трещин, фиксировали положение трещины.

На рис. 2 представлена зависимость значения *b*-параметра от времени при нагружении балки нагрузкой с 1700 до 3000 кгс.

На этапе нагружения можно выделить два временных интервала, в которых наблюдается падение *b*-параметра: 2500-я секунда (интервал времени t_1) – значение *b*-параметра 0,7 и 2530-я секунда (интервал времени t_2) – значение *b*-параметра 0,5. Момент t_1 соответствует образованию и росту трещин нормального отрыва, а момент t_2 соответствует образованию сдвиговых трещин, а также слиянию нескольких микротрещин между собой, что характеризует два различных состояния.

Численные значения *b*-параметра характеризуют степень повреждения, которая может быть определена на основании предварительно установленных границ классификации.

Наблюдается взаимосвязь между локальным изменением *b*-параметра и численными значениями АЭ-параметров (рис. 3).

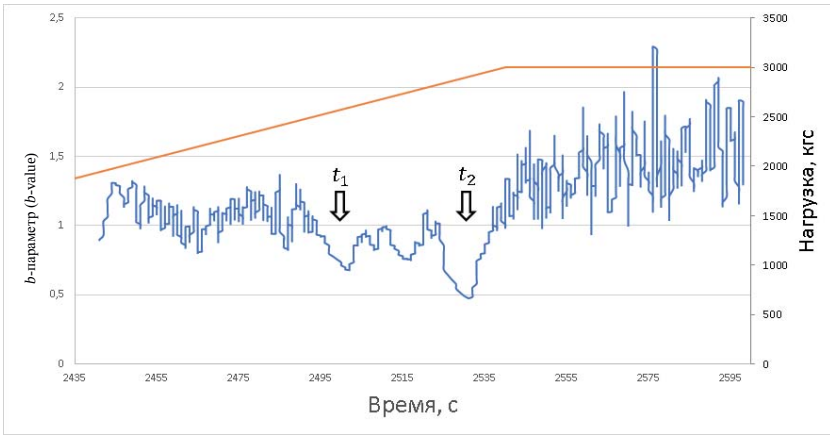
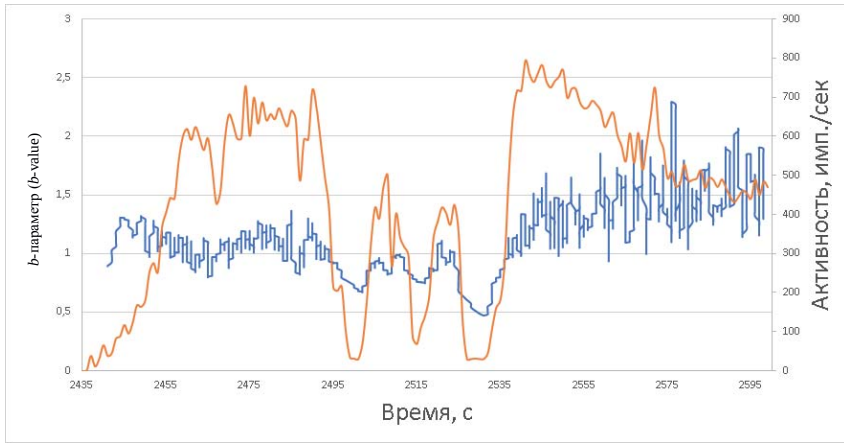
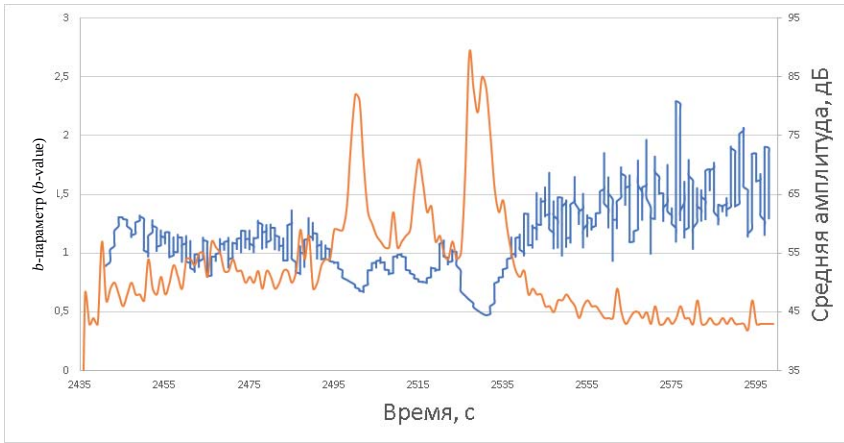


Рис. 2. Зависимость *b*-параметра и нагрузки от времени
Fig. 2. Time dependence of *b*-parameter and load



а



б

Рис. 3. Временные зависимости амплитуды сигналов АЭ и *b*-параметра (*а*); временные зависимости активности АЭ и *b*-параметра (*б*)
Fig. 3. Time dependences of AE signal amplitude and *b*-parameter (*a*); time dependences of AE activity and *b*-parameter (*б*)

Пример оценки трещинообразования конструкций на основе метода инвариантов

Рассматриваются результаты контроля образования трещин при испытании четырех железобетонных балок. Балка № 1 изготавливалась из бетона В60 с фиброй, балка № 2 – из бетона В60, балка № 3 – из бетона В30 с фиброй, балка № 4 – из бетона В90. Размеры балок: длина – 2200 мм, высота – 290 мм, ширина – 160 мм. Железобетонные балки армировались арматурными каркасами.

АЭ измерения выполняли с использованием цифровой АЭ-системы. Преобразователи АЭ крепились на две боковые и верхнюю поверхности балки. Для регистрации сигналов использовались преобразователи АЭ частотным диапазоном от 30 до 300 кГц.

Нагрузку к балкам прикладывали ступенчато. На этапе приложения нагрузки и выдержки под нагрузкой регистрировались импульсы АЭ, фиксировался прогиб балки, на этапах выдержки измерялись длина и ширина раскрытия трещин. В том случае если существующая трещина на последующем этапе приложения нагрузки «прорастала», фиксировалась и измерялась и эта величина. Для каждого этапа испытания длины всех трещин суммировались. Для анализа использовался самый активный канал АЭ-прибора, который позволял регистрировать импульсы АЭ из растянутой и сжатой зон бетона балок.

Связь регистрируемых импульсов АЭ с конкретным физическим процессом разрушения определяется по отклонению от устойчивых (инвариантных) статистических распределений параметров АЭ. Появление инвариантных отклонений регистрируемых значений этих соотношений от их инвариантных значений может служить критерием перехода на следующую стадию деформации или разрушения. Образование трещин приводит к тому, что временной инвариантный критерий принимает численные значения, не равные единице, условие $I_{1t} = \frac{S_{\Delta t}}{\Delta t} \neq 1$ соответствуют стадии образования видимой трещины в бетоне конструкции. Численные значения амплитудного инвариантного критерия, не равного 0,1, и условие $I_{1A} = S_A / A \neq 0{,}1$ соответствуют стадии образования трещины в бетоне железобетонной конструкции.

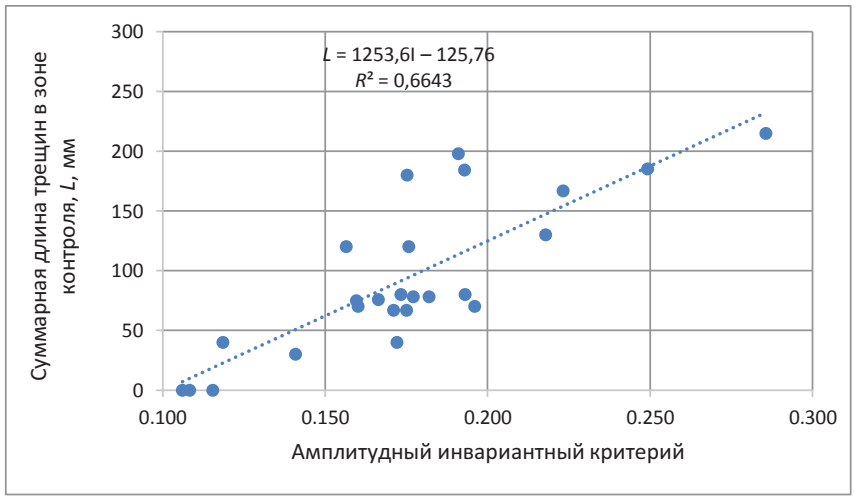


Рис. 4. Градировочная зависимость между длиной трещин и амплитудным инвариантным критерием
Fig. 4. Calibration dependence between crack length and invariant amplitude

На рис. 4 приведена градировочная зависимость, построенная по результатам расчета амплитудного инвариантного критерия и суммарной длины трещины для четырех балок. Предлагается использовать инвариантные критерии для экспертной оценки наличия и размеров трещин в зоне контроля.

Пример обработки результатов классификации трещин в железобетонных балках

В примере приведены результаты испытания шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Сечение балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм. Балка изготавливалась из бетона по прочности на сжатие В90. Балка армировалась тремя арматурными стержнями диаметром 14 мм в нижнем сечении, двумя арматурными стержня диаметром 10 мм в среднем сечении и двумя арматурными стержнями диаметром 14 мм в верхнем сечении. Режим приложения нагрузки к балке – ступенчатый. Балку доводили до разрушения.

Для измерения АЭ использовалась многоканальная АЭ-система в комплектации с 12 каналами с преобразователями с рабочей полосой частот 3–60 кГц. Порог был установлен 40 дБ. Данный порог позволил устранить фоновый шум и зафиксировать АЭ при трещинообразовании. Преобразователи АЭ крепились с двух сторон на боковые поверхности балки.

Нагрузка прикладывалась ступенчато. На каждой ступени нагружения проводились измерения прогиба балки, измерялись длина и ширина раскрытия трещин, фиксировалось положение трещины. АЭ-аппаратурой производилась регистрация параметров сигналов АЭ.

Классификацию развивающихся трещин выполняют при ступенчатом нагружении конструкции. В ходе испытания наряду со стандартными параметрами сигналов АЭ регистрируют *RA*-значения и среднюю частоту импульса АЭ – *AF*.

RA-значение вычисляют по формуле

$$RA\text{-значение} = \frac{RT}{A_{\max}}, \qquad (1)$$

где RT – время нарастания сигнала АЭ, мкс;

$A_{\max}$ – амплитуда сигнала АЭ, В.

Среднюю частоту импульса АЭ – AF, кГц, вычисляют по формуле

$$AF = \frac{C}{T_d}, \qquad (2)$$

где C – число выбросов сигнала АЭ;

T_d – длительность сигнала АЭ, мкс.

По (1) и (2) вычисляют AF и RA-значение путем усреднения данных параметров для выборки из 50 или более импульсов. Каждое значение наносят на диаграмму для классификации.

На рис. 5 приведена классификация активных трещин для данной балки. Из рис. 5*а* следует, что активные трещины относятся к трещинам растяжения. Для данной нагрузки в балке были зафиксированы две видимые трещины в середине пролета балки с шириной раскрытия 0,1 мм в растянутой зоне бетона.

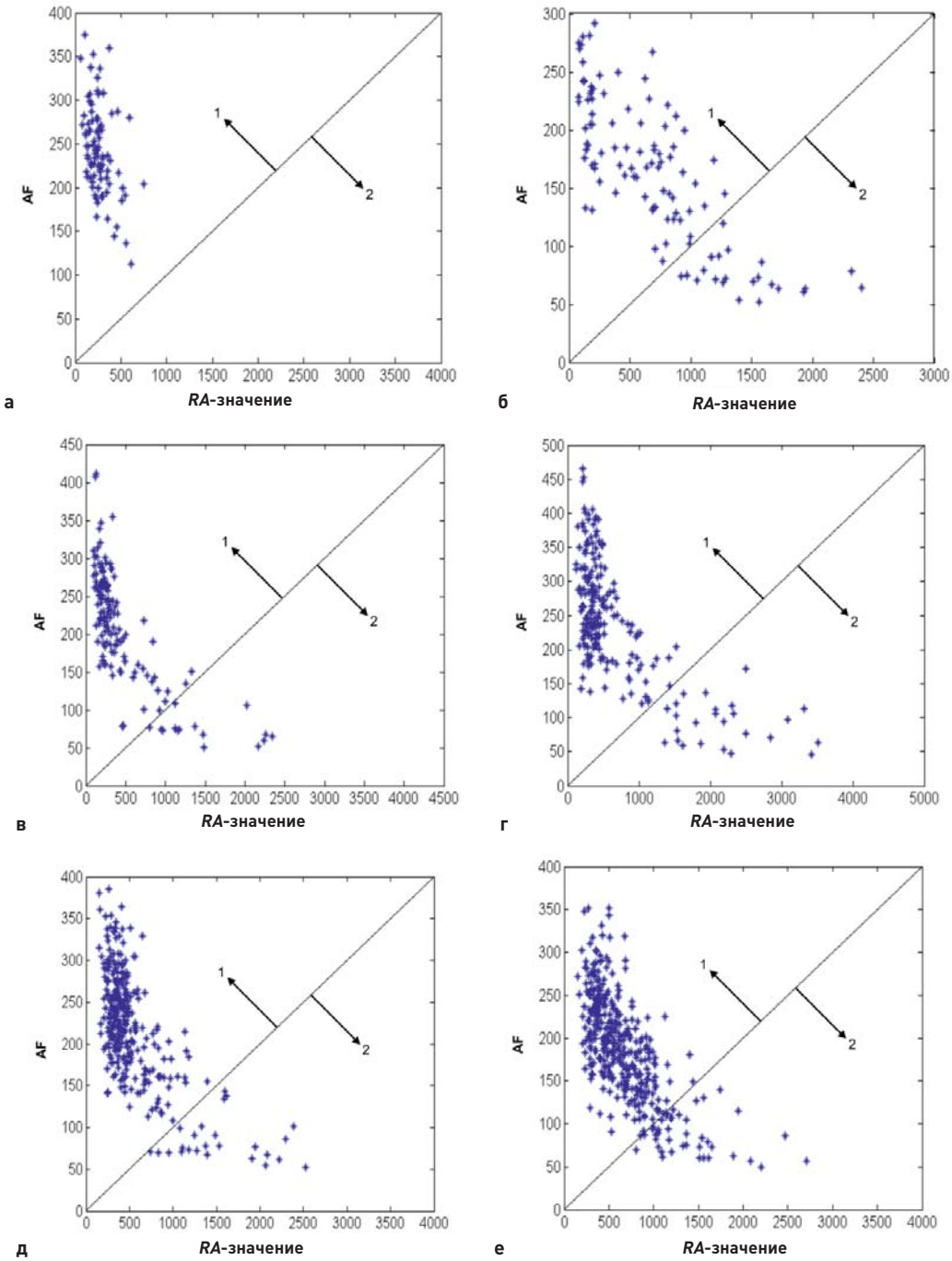


Рис. 5. Пример классификации активных трещин: *1* – область, соответствующая трещинам растяжения; *2* – область, соответствующая трещинам сдвига и иным типам трещин; *а* – нагрузка 15 кН; *б* – нагрузка 30 кН; *в* – нагрузка 45 кН; *г* – нагрузка 60 кН; *д* – нагрузка 75 кН; *е* – нагрузка 85 кН

Fig. 5. A classification of active cracks: *1* – area corresponding to tensile cracks; *2* – area corresponding to shear cracks and other types of cracks; *а* – 15 kN load; *б* – 30 kN load; *в* – 45 kN load; *г* – 60 kN load; *д* – 75 kN load; *е* – 85 kN load

На следующем этапе нагружения (рис. 5*б*) активные трещины классифицируются как трещины растяжения и трещины сдвига. На этом этапе в растянутой зоне бетона появилась новая трещина, длина существующих трещин увеличилась. Появление на диаграмме трещин сдвига визуальным контролем подтверждено не было. Только на следующем этапе нагрузки вблизи опоры образовалась небольшой длины видимая трещина. Наклонная трещина визуально была зафиксирована только при нагрузке 60 кН (рис. 5*г*). Это указывает на то, что метод АЭ позволяет обнаружить дефект задолго до видимого его проявления.

На рис. 5*д, е* показана классификация активных трещин при дальнейшем увеличении нагрузки.

Пример обработки результатов оценки повреждений в железобетонных балках

В примере приведены результаты испытания шарнирно опертой железобетонной балки на трехточечный изгиб. Сосредоточенная сила прикладывалась в середине пролета балки. Сечение балки – 150 × 200(h) × 1500 мм. Рабочий пролет балки – 1350 мм. Балка изготавливалась из бетона по прочности на сжатие В60. Балка армировалась двумя арматурными стержнями диаметром 14 мм в нижнем сечении, двумя арматурными стержнями диаметром 10 мм в среднем и верхнем сечениях.

Для измерения АЭ использовалась 12-канальная АЭ-система. Использовались преобразователи с рабочей полосой частот 3–60 кГц. Порог был выбран 40 дБ. Данный порог позволил устранить фоновый шум и зафиксировать АЭ при трещинообразовании. Преобразователи АЭ крепились с двух сторон на боковые поверхности балки. Для создания акустического контакта преобразователя с конструкцией применялся литол.

Режим приложения нагрузки к балке был ступенчатый, с разгрузкой и повторным нагружением на каждой ступени. Выдержка под нагрузкой проводилась 10–15 минут. Балку доводили до разрушения.

В процессе нагружения и выдержки под нагрузкой проводилось измерение прогиба образца, измерялись длина и ширина раскрытия трещин, а также регистрировали параметры сигналов АЭ.

Повреждения балок оценивают с помощью коэффициента нагрузки L и коэффициента разгрузки CR.

Коэффициент нагрузки L вычисляют по формуле

$$L = \frac{L_0}{L_p}, \tag{3}$$

где L_0 – величина нагрузки при появлении АЭ в последующем цикле нагружения;

L_p – предыдущая максимальная нагрузка.

Коэффициент разгрузки CR вычисляют по формуле

$$CR = \frac{A_u}{A_t}, \tag{4}$$

где A_u – суммарная АЭ при снятии нагрузки;

A_t – суммарная АЭ цикла нагружения, выдержки под нагрузкой и снятия нагрузки.

По (3) и (4) проводят расчет коэффициента нагрузки и коэффициента разгрузки для каждого цикла. В случае использования многоканальной системы расчет проводится для самого активного канала. Полученные значения наносят на диаграмму. Границы классификации принимались в соответствии с [4]. Диаграмма классификации повреждений представлена на рис. 6.

На рис. 6 показана классификация степени повреждения в балке. Повреждения характеризуются как слабые, средние, сильные. Степень повреждения балки устанавливалась по ширине раскрытия трещин, суммарной длине трещин на этапе нагружения, наличию наклонных трещин, разрушению сжатого бетона, появлению сквозных трещин.

Принималось, что слабые повреждения соответствуют трещине с шириной раскрытия 0,1–0,2 мм, средние повреждения соответствуют трещине с шириной раскрытия 0,15–0,3 мм и (или) появлению горизонтальных и (или) наклонных трещин, сильные повреждения соответствуют трещине с шириной раскрытия более 0,3 мм. Сильные повреждения характеризуются также разрушением сжатой зоны бетона и появлением сквозной трещины.

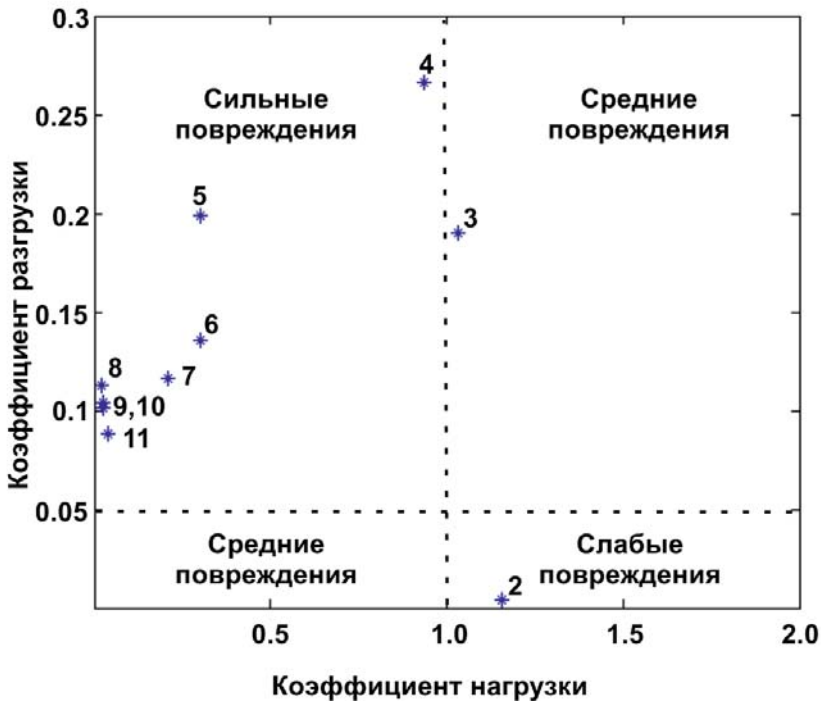
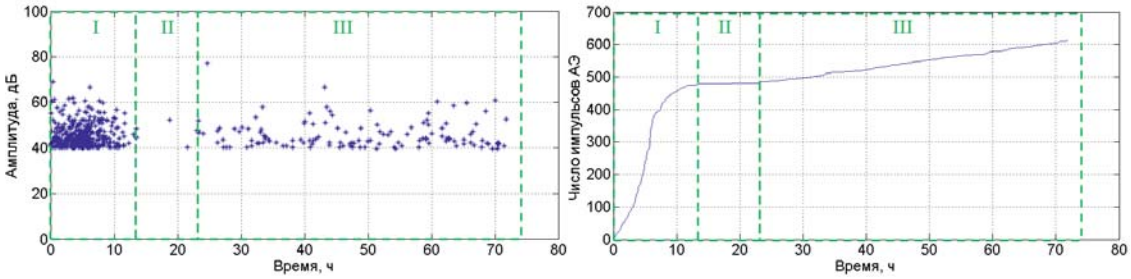


Рис. 6. Классификация повреждения в балке на этапах нагружения:
1 – нагрузка 15 кН; *2* – нагрузка 30 кН; *3* – нагрузка 45 кН; *4* – нагрузка 60 кН; *5* – нагрузка 75 кН; *6* – нагрузка 85 кН; *7* – нагрузка 95 кН; *8* – нагрузка 105 кН; *9* – нагрузка 115 кН; *10* – нагрузка 125 кН; *11* – нагрузка 135 кН

Fig. 6. Classification of beam damage at the stages of loading
1 – 15 kN load; *2* – 30 kN load; *3* – 45 kN load; *4* – 60 kN load; *5* – 75 kN load; *6* – 85 kN load; *7* – 95 kN load; *8* – 105 kN load; *9* – 115 kN load; *10* – 125 kN load; *11* – 135 kN load



а **б**

Рис. 7. Зависимости: *а* – число импульсов АЭ/время; *б* – амплитуда АЭ/время
Fig. 7. Dependences: *а* – number of AE pulses/time; *б* – AE amplitude/time

Пример обработки результатов акустико-эмиссионного мониторинга прогноза прочности бетона в процессе твердения

По изменению АЭ-параметров с течением времени можно выделить три временных интервала, характеризующихся различной степенью интенсивности АЭ, что отражается как в количестве регистрируемых импульсов (рис. 7*а*), так и в значении их энергетических параметров (рис. 7*б*). Каждый из трех временных интервалов соответствует различным периодам структурообразования бетона:

– I – период растворения (начальный и индукционный периоды);

– II – ускоренный (период схватывания);

– III – период кристаллизации (твердения).

В качестве параметров, коррелирующих с прочностью бетона в возрасте 28 суток, анализировались численные значения АЭ-параметров в пределах различных периодов и параметры их распределений. Наиболее информативными параметрами являются:

– Δt – длительность второго периода;

– $tg(\alpha_I)$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для первого периода;

– $tg(\alpha_{III})$ – тангенс угла наклона зависимости числа импульсов АЭ от времени для третьего периода.

Получена высокая корреляция между прочностью бетона в возрасте 28 суток и информативными параметрами АЭ данных. Коэффициент корреляции составляет 0,86; 0,84 и 0,81 для зависимостей (Δt), $tg(\alpha_I)$ и $tg(\alpha_{III})$ соответственно.

Пример акустико-эмиссионного мониторинга набора прочности бетона в процессе твердения

АЭ-метод позволяет в режиме реального времени контролировать процесс набора прочности бетона. В качестве примера на рис. 8 представлена зависимость суммарной энергии импульсов АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени для бетонного куба, изготовленного из тяжелого бетона с химической добавкой. Прочность бетона измерялась путем сжатия под прессом контрольных образцов на 1, 2, 9, 14 и 28-е сутки. Промежуточные значения получались путем аппроксимации имеющейся кривой. Суммарная энергия импульсов

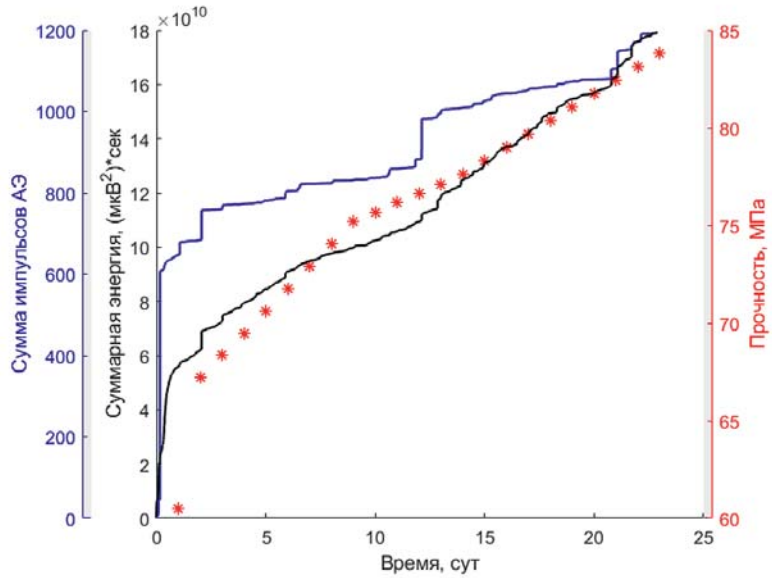


Рис. 8. Зависимости суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени (тяжелый бетон с химическими добавками)
Fig. 8. Time dependences of AE total energy, number of AE pulses, and strength (heavy concrete with chemical additives)

АЭ была выбрана в качестве наиболее информативного параметра в ходе предварительно проведенного анализа.

Зависимости суммарной энергии импульсов АЭ, числа импульсов АЭ, отражающие процесс накопления импульсов АЭ, а также их энергетический вклад и прочности от времени, имеют схожий внешний вид. Это связано с тем, что метод АЭ регистрирует активность, которая непосредственно связана с физическими процессами, протекающими при структурообразовании и твердении бетона и, как следствие, отвечающими за увеличение его прочности.

Начиная с третьих суток представленные зависимости имеют однозначную взаимосвязь. Коэффициент корреляции для зависимости суммарной энергии АЭ от прочности составляет 0,94, а для зависимости числа импульсов АЭ от прочности – 0,95.

Аналогичные зависимости были построены для тяжелых бетонов с минеральными добавками (рис. 9), а также для мелкозернистых бетонов (рис. 10).

Коэффициент корреляции для зависимости суммарной энергии АЭ от прочности составляет 0,94, а для зависимости числа импульсов АЭ от прочности – 0,97.

Коэффициент корреляции для зависимости суммарной энергии АЭ от прочности бетона составляет 0,93, а для зависимости числа импульсов АЭ от прочности бетона – 0,96. Подобного рода зависимости могут быть использованы в качестве градировочных в процессе мониторинга бетонных и железобетонных конструкций с целью определения прочности бетона.

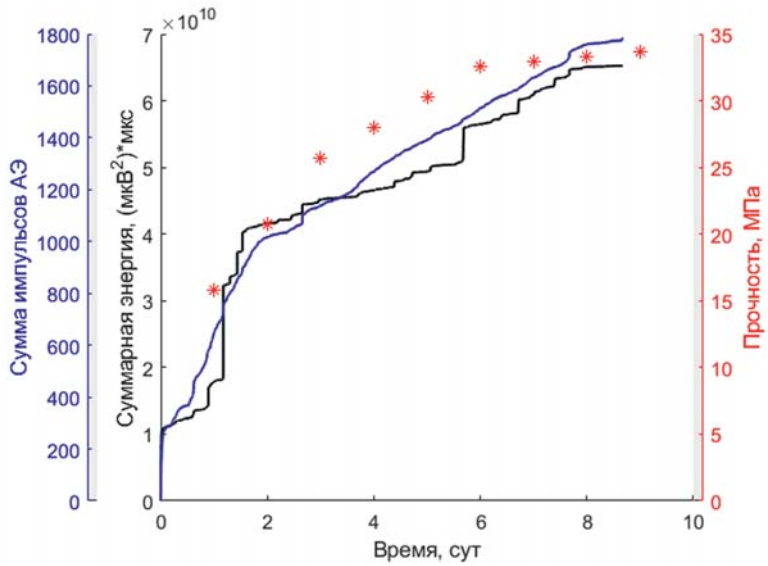


Рис. 9. Зависимости суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени, суммарной энергии АЭ от прочности и числа импульсов АЭ от прочности (тяжелый бетон с минеральными добавками)
Fig. 9. Dependences of AE total energy, number of AE pulses, and strength on time; AE total energy on strength; number of AE pulses on strength (heavy concrete with mineral additives)

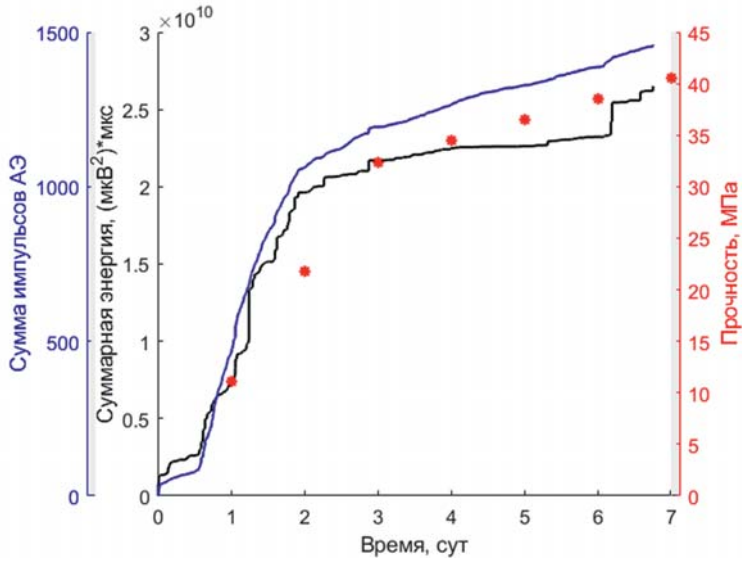


Рис. 10. Зависимости суммарной энергии АЭ, числа импульсов АЭ и прочности от времени, суммарной энергии АЭ от прочности и числа импульсов АЭ от прочности (мелкозернистый бетон)
Fig. 10. Dependences of AE total energy, number of AE pulses, and strength on time; AE total energy on strength; number of AE pulses on strength (fine-grained concrete)

Основные выводы

Приведенные технологии могут применяться для мониторинга и технической диагностики строящихся и эксплуатируемых конструкций из бетона и железобетона. Эффект от реализации технологий в строительстве выразится в повышении безопасности и надежности конструкций за счет внедрения технологий акустико-эмиссионного контроля.

Список литературы

1. *Сагайдак А.И.* Состояние и перспективы использована метода акустической эмиссии в современном строительстве. Взгляд в будущее. В : Бетон и железобетон - взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону: Москва, 12–16 мая 2014 г. Т. 2. Москва: Московский государственный строительный университет; 2014, с. 427–438.
2. *Сагайдак А.И., Елизаров С.В.* Связь сигналов акустической эмиссии с процессами деформирования и разрушения строительных конструкций. Дефектоскопия. 2004;(11):32–39.
3. *Бардаков В.В., Сагайдак А.И., Елизаров С.В.* Акустическая эмиссия переармированных железобетонных балок. Контроль. Диагностика. 2019;(9):4–12. https://doi.org/10.14489/td.2019.09.pp.004-012
4. ГОСТ Р 59938-2021. Бетоны. Акустико-эмиссионный метод контроля. Москва: Российский институт стандартизации; 2022.
5. *Буйло С.И.* Физико-механические, статистические и химические аспекты акустико-эмиссионной диагностики. Ростов-на-Дону: Изд-во ЮФУ; 2017.
6. *Буйло С.И.* Об информативности метода инвариантов сигналов акустической эмиссии в задачах диагностики предразрушающего состояния материалов. Дефектоскопия. 2018;(4):18–23.
7. *Иванов В.И., Барат В.А.* Акустико-эмиссионная диагностика. Москва: Спектр; 2017.
8. *Сагайдак А.И.* Способ определения предельного состояния строительных конструкций. Пат. RU2417369C2. Опубл. 27.04.2011.
9. ISO 16838. Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Test method for classification of active cracks in concrete structures [internet]. International Organization of Standards; 2019. Available at: https://www.iso.org/standard/68781.html
10. *Сагайдак А.И.* Исследование эффекта Кайзера в сжатых железобетонных элементах. В: Экспериментальные и теоретические исследования строительных конструкций. Сб. научн. тр. ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Москва; 1991, с. 127–129.
11. *Сагайдак А.И., Бардаков В.В., Боровкова Е.С.* Разработка методики и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии. Бетон и железобетон. 2023;(1):33–42. https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42
12. Разработка методики контроля и прогноза прочности бетона в раннем возрасте методом акустической эмиссии. Эксперимент на Курской АЭС-2, сентябрь 2022 года. Отчет по НИОКР.
13. *Сагайдак А.И., Бардаков В.В., Елизаров С.В., Иванов В.И.* Стандарты по контролю технического состояния железобетонных конструкций методом акустической эмиссии. Контроль. Диагностика. 2020;23(6):32–39. https://doi.org/10.14489/td.2020.06.pp.032-039

References

1. *Sagaidak A.I.* Condition and prospects of using acoustic emission method in modern construction. Concrete and Reinforced concrete – a look into the future: Scientific papers of the III All-Russian (II International) Conference on Concrete and Reinforced Concrete: Moscow, May 12–16, 2014. Vol. 2. Moscow: Moscow State University of Civil Engineering; 2014, pp. 427–438. (In Russian).
2. *Sagaidak A.I., Elizarov S.V.* The relationship of acoustic-emission signals with the processes of deformation and fracture of building structures. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2004;(11):739–745. (In Russian).
3. *Bardakov V.V., Sagaydak A.I., Elizarov S.V.* Acoustic emission behaviour of over-reinforced concrete beams. Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics. 2019;(9):4–12. (In Russian). https://doi.org/10.14489/td.2019.09.pp.004-012

4. State Standard R 59938-2021. Concretes. Acoustic emission testing method. Moscow: Russian Institute for Standardization; 2022. (In Russian).
5. *Builo S.I.* Physico-mechanical, statistical and chemical aspects of acoustic emission diagnostics. Rostov-on-Don: SFU Publishing House; 2017. (In Russian).
6. *Builo S.I.* On the Information Value of the Method of Invariants of Acoustic-Emission Signals in the Diagnostics of Pre-Failure State in Materials. Russian Journal of Nondestructive Testing. 2018;(4):237–242. (In Russian). https://doi.org/10.1134/s1061830918040034
7. *Ivanov V.I., Barat V.A.* Acoustic emission diagnostics. Moscow: Spectrum Publ.; 2017. (In Russian).
8. *Sagaydak A.I.* Method for determining the limit state of building structures. Patent No RU2417369C2. Publ. date 27 April 2011. (In Russian).
9. ISO 16838. Non-destructive testing — Acoustic emission testing — Test method for classification of active cracks in concrete structures [internet]. International Organization of Standards; 2019. Available at: https://www.iso.org/standard/68781.html
10. *Sagaydak A.I.* And The study of the Kaiser effect in compressed reinforced concrete elements. In: Experimental and theoretical studies of building structures. Collection of scientific tr. TSNIISK named after V.A. Koucherenko. Moscow; 1991, pp. 127–129. (In Russian).
11. *Sagaydak A.I., Bardakov V.V., Borovkova E.S.* Development of methods and prediction of concrete strength at an early age by acoustic emission method. Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2023;615(1):33–42. (In Russian). https://doi.org/10.37538/0005-9889-2023-1(615)-33-42
12. Development of methods for monitoring and predicting the strength of concrete at an early age by acoustic emission method. Experiment at Kursk NPP-2, September 2022. R&D Report. (In Russian).
13. *Sagaydak A.I., Bardakov V.V., Elizarov S.V., Ivanov V.I.* Standards for the technical state testing of reinforced concrete structures by means of acoustic emission method. Kontrol'. Diagnostika = Testing. Diagnostics. 2020;23(6):32–39. (In Russian). https://doi.org/10.14489/td.2020.06.pp.032-039

Информация об авторе / Information about the author

Александр Иванович Сагайдак, канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник центра № 20 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: sagaidak-niizhb@mail.ru
Alexandr I. Sagaidak, Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher of the Center No. 20, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: sagaidak-niizhb@mail.ru

УДК 624.072.2.014
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-82-105 EDN: RJORZZ

ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ И РЕКОНСТРУКЦИЙ БОЛЬШОЙ СПОРТИВНОЙ АРЕНЫ СТАДИОНА «ЛУЖНИКИ»

М.И. ФАРФЕЛЬ[1,2], канд. техн. наук

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

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

Аннотация

Введение. В статье рассказывается об изменении покрытия над Большой спортивной ареной (БСА) стадиона «Лужники» с начала возведения и до наших дней. Показывается, как изменялось покрытие над трибунами БСА, включая три реконструкции стадиона, которые осуществлялись по различным причинам в течение 65-летней истории существования.

Цель. Показать процесс и особенности возведения покрытия над трибунами арены и создания стадиона, удовлетворяющего требованиям Международной федерации футбола (FIFA) для стадионов, на которых проводятся матчи открытия и финала Кубка мира по футболу.

Материалы и методы. Приведены способы создания уникального большепролетного покрытия стального купольного типа, имеющего наибольший безопорный пролет для сооружений такого класса, равный 310 м. Автором статьи описан процесс проектирования, проведения испытаний большеразмерной модели и испытаний в аэродинамической трубе специально изготовленной модели для определения снеговой и ветровой нагрузок. Подробно показан процесс монтажа покрытия, сборки наружного опорного контура и установки их на колонны. Описан процесс сборки внутреннего контура, периметр которого составил около 600 м, а вес – 4500 тс. После сборки внутреннего контура он в течение трех дней целиком был поднят на проектную отметку, которая достигала приблизительно значения 50 м. После этого между наружным опорным и внутренним контурами устанавливались криволинейные балки, между которыми монтировались кольцевые фермы. На каркас купола впервые в строительной практике нашей страны установлена светопрозрачная кровля из поликарбонатных панелей. Это была вторая реконструкция покрытия. Первая проводилась к Олимпиаде-80 в Москве. Третья реконструкция покрытия проведена для удовлетворения строгих требований FIFA. В ходе проведения реконструкции были демонтированы старые трибуны и сооружены новые. Увеличена площадь покрытия над трибунами, которые стали приближены к полю на 17 м, чтобы зрители были защищены от атмосферных осадков. Приняты меры для обеспечения несущей способности существующего большепролетного покрытия при проведении реконструкции стадиона.

Результаты. Разработана и осуществлена реконструкция Большой спортивной арены стадиона «Лужники». Реконструированная арена признана УЕФА (Европейской федерацией футбола) одним из лучших стадионов мира и получила квалификацию «Элит».

Выводы. Принципы реконструкции стадиона большой вместимости на примере усовершенствования Большой спортивной арены стадиона «Лужники» можно использовать для удовлетворения требований FIFA на других аренах с трибунами не менее 80 000 зрителей.

Ключевые слова: большепролетное покрытие, безопорный пролет, стальные конструкции, наружный опорный контур, внутренний контур, криволинейная радиальная балка, кольцевая ферма, консольная часть покрытия, светопрозрачная кровля, поликарбонат

Для цитирования: Фарфель М.И. История создания и реконструкций Большой спортивной арены стадиона «Лужники». *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):82–105. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-82-105

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

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 15.05.2023
Поступила после рецензирования 21.06.2023
Принята к публикации 27.06.2023

HISTORY OF CREATION AND RECONSTRUCTION OF THE GRAND SPORTS ARENA OF THE LUZHNIKI STADIUM

M.I. FARFEL[1,2], Cand. Sci. (Engineering)

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

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

Abstract

Introduction. The paper presents the process of renovating the roof over the Grand Sports Arena (GSA) of the Luzhniki Stadium from its construction to the present day. It demonstrates the modifications in the roof over the GSA stands, including three reconstructions of the stadium, which were carried out for various reasons during the 65-year history of the stadium.

Aim. To describe the process and peculiarities of erecting the roof over the arena stands and creating a stadium that meets the requirements of the International Football Federation (FIFA) for stadiums hosting the opening and final matches of the FIFA World Cup.

Materials and methods. The study involved methods for creating a unique large-span steel roof of a dome type with the largest unsupported span (310 m) for structures of this class. The paper describes the process of designing and testing a large-size model and a specially made model in a wind tunnel to determine the snow and wind loads. The process of erecting the roof, assembling the outer support contour, and lifting it on the columns is shown in detail. The process of assembling the inner contour is described. Its perimeter accounts for about 600 m, and its weight is 4500 tf. After assembling, the inner contour was lifted to the design level at approximately 50 m within three days. After that, curved beams were installed between the outer support and inner contours with ring trusses in between. A translucent roof made of polycarbonate panels was installed on the dome frame for the first time in the construction practice of Russia. This was the second reconstruction of the roof. The first one was arranged for the 1980 Summer Olympics in Moscow. The third reconstruction of the roof was carried out to meet the strict requirements of FIFA. The reconstruction involved dismantling old stands and building new ones. The roof over the stands became 17 meters closer to the field, and its area was increased to protect the spectators from atmospheric precipitation. Measures were taken to ensure the bearing capacity of the existing large-span roof during the stadium renovation.

Results. The reconstruction of the Grand Sports Arena of the Luzhniki Stadium was developed designed and implemented. The reconstructed arena was recognized by UEFA (Union of European Football Associations) as one of the best stadiums in the world and received "Elite" qualification.

Conclusion. The principles of reconstruction of a large-capacity stadium on the example of the renovated Grand Sports Arena of the Luzhniki Stadium can be used to meet the requirements of FIFA in other arenas with stands for at least 80,000 spectators.

Keywords: long-span roof, unsupported span, steel structures, outer support contour, inner contour, curved radial beam, ring truss, cantilever part of the roof, translucent roof, polycarbonate

For citation: Farfel M.I. History of creation and reconstruction of the Grand Sports Arena of the Luzhniki stadium. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):82–105. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-82-105

Author contribution statement
The author takes responsibility for all aspects of the paper.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The author declares no conflict of interest.

Received 15.05.2023
Revised 21.06.2023
Accepted 27.06.2023

Введение

В данной работе рассказывается о создании и реконструкции главного стадиона страны. В статье объясняются причины проведения всех реконструкций стадиона, объясняются способы изготовления и монтажа покрытия над стадионом, а также мероприятия при проведении реконструкции к Кубку мира по футболу в 2018 году для удовлетворения требований Международной федерации футбола (FIFA).

Цель

Показать процесс создания покрытия над трибунами арены и создания стадиона, удовлетворяющего требованиям FIFA для стадионов, на которых проводятся матчи открытия и финала Кубка мира по футболу.

Сооружение стадиона «Лужники»

Решение о строительстве комплекса спортивных сооружений «Лужники» принято Советом Министров СССР в 1954 году. Архитекторами стадиона были А. В. Власов, И. А. Рожин, Н. Н. Уллас и А. Ф. Хряков. Инженерами являлись В. Н. Насонов, И. М. Резников, В. М. Поликарпов. Причем В. Н. Насонов был в то время директором ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко.

Проектирование комплекса завершилось за 90 дней, 31 июля 1956 года стадион был открыт. Его строительство осуществилось за 450 дней.

Рис. 1. Вид стадиона с 1956 по 1979 год
Fig. 1. View of the stadium from 1956 to 1979

Первоначальная вместимость стадиона составляла 110 тыс. зрителей, но в качестве посадочных мест были сплошные деревянные лавки (рис. 1).

Первым спортивным мероприятием, состоявшимся на стадионе, был футбольный матч между командами РСФСР и КНР. А несколько дней спустя на БСА стартовала первая Спартакиада народов СССР.

Первая реконструкция БСА состоялась перед Олимпиадой 1980 года. Были смонтированы четыре осветительные башни, обеспечивающие освещенность арены порядка 2000 люкс, что позволяло вести с Олимпиады телепередачи в цветном формате, также была установлена чаша олимпийского огня (рис. 2).

На БСА прошли соревнования по различным видам спорта, включая футбольные матчи олимпийского турнира, а также церемонии открытия и закрытия Олимпийских игр 1980 года (рис. 3).

Создание покрытия над трибунами БСА стадиона «Лужники»

Вторая реконструкция состоялась из-за того, что Международная федерация футбола (FIFA) выпустила требования о том, что все зрители, присутствующие на стадионе, должны быть защищены от атмосферных осадков. Необходимо было над зрительными местами создать покрытие.

Рис. 2. Вид стадиона с 1980 по 1996 год
Fig. 2. View of the stadium from 1980 to 1996

Рис. 3. БСА во время Олимпиады 1980 года
Fig. 3. GSA during the 1980 Olympics

После длительного конкурса принято решение его создать в форме стержневого стального купола, причем покрытие должно опираться на колонны, отстоящие от конструкций стадиона на 5 м.

Авторами проекта покрытия над стадионом «Лужники» были архитекторы А.Г. Оспенников, Г.Е. Ермилина, Т.В. Катунина; инженеры В.В. Ханджи, А.В. Ханджи от МНИИП «Моспроект-4»; сотрудники ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко В.Б. Микулин, М.И. Фарфель.

В результате запроектировано и затем осуществлено большепролетное покрытие с наибольшим в мире безопорным пролетом для такого класса сооружения, который составил 310 м.

Перед началом проектирования в аэродинамической трубе была осуществлена продувка модели будущего покрытия, т.к. в нормах [1] отсутствовали данные по значениям атмосферных нагрузок. Это позволило определить реальные значения снеговых и ветровых нагрузок для проведения расчета покрытия и проверки несущей способности входящих в его состав стальных элементов [3, 4, 9] (рис. 4).

Кроме того, была испытана большепролетная модель покрытия, на которой выяснялась работа системы от действия на нее разнообразных нагрузок (рис. 5) [4].

На этой же модели проведена попытка смоделировать осадку опор, опирающихся на основание. Были удалены из работы одна, две и три колонны. Такая схема, кроме своего первоначального назначения, явилась прообразом моделирования испытаний для проверки устойчивости конструкции от прогрессирующего обрушения (рис. 6).

Кроме модели сооружения испытывались отдельные модели фрикционного соединения, а также выяснялась работа нового типа кровли из светопрозрачного поликарбоната. Испытания проведены в лаборатории испытаний ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко (рис. 7) [4].

После проведения всех испытаний и выпуска проекта покрытия, в состав которого входил и расчет с проверкой несущей способности всех конструкций системы [9],

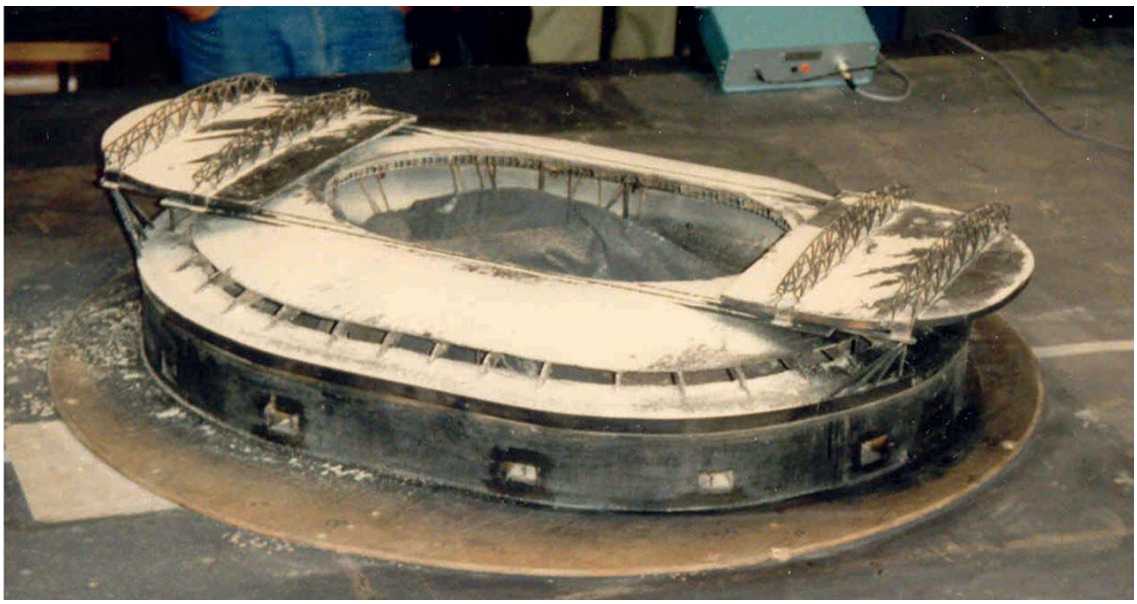


Рис. 4. Испытание модели в аэродинамической трубе
Fig. 4. Model wind tunnel testing

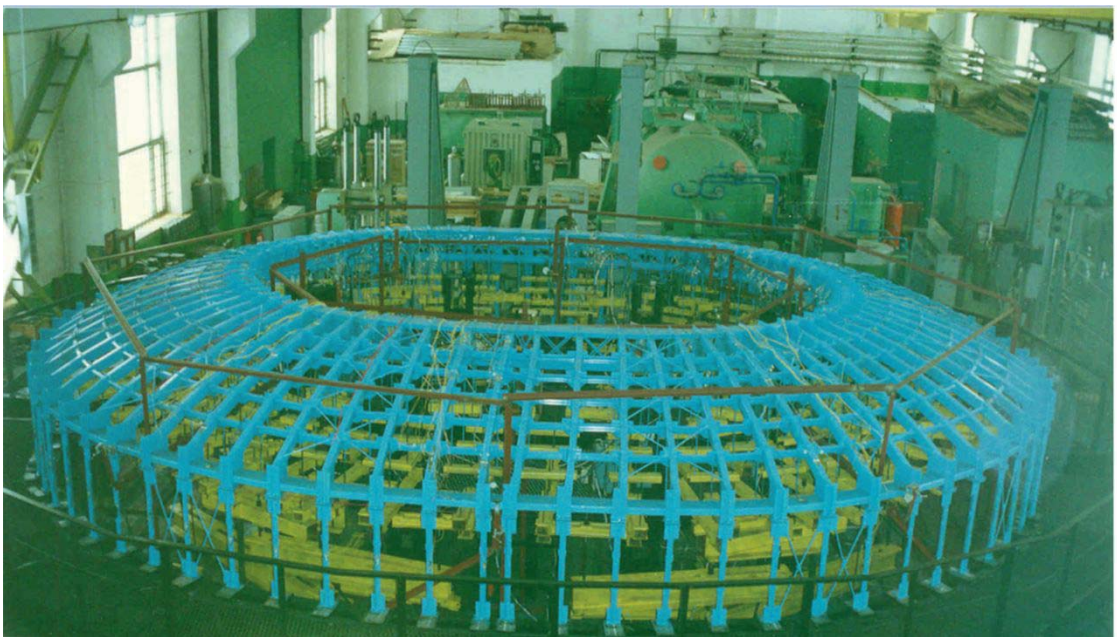


Рис. 5. Испытание большепролетной модели покрытия БСА
Fig. 5. Testing of a large-span model of the GSA roof

а **б** **в**

Рис. 6. Испытания, моделирующие устойчивость каркаса от прогрессирующего обрушения, исключением из работы: *а* – одной колонны; *б* – двух колонн; *в* – трех колонн
Fig. 6. Tests, modeling the progressive collapse resistance of the frame by excluding: *а* – one column; *б* – two columns; *в* – three columns

на двух заводах металлоконструкций были изготовлены элементы покрытия, которые затем были доставлены на строительную площадку для их сборки в пространственный каркас покрытия.

Отметим особенности каркаса покрытия стадиона. Купол покрытия шарнирно оперт на колонны, которые, в свою очередь, шарнирно прикреплены к фундаменту, что позволяет колоннам воспринимать только сжимающие продольные усилия при отсутствии изгибающих моментов. Этот прием позволяет сократить материалоемкость колонны и облегчить создание узлов прикрепления колонны к покрытию и к фундаменту.

Монтаж колонн покрытия изображен на рис. 8 [4].

Осуществление шарнирного опирания выполняется при помощи отфрезерованных торцов опорных элементов.

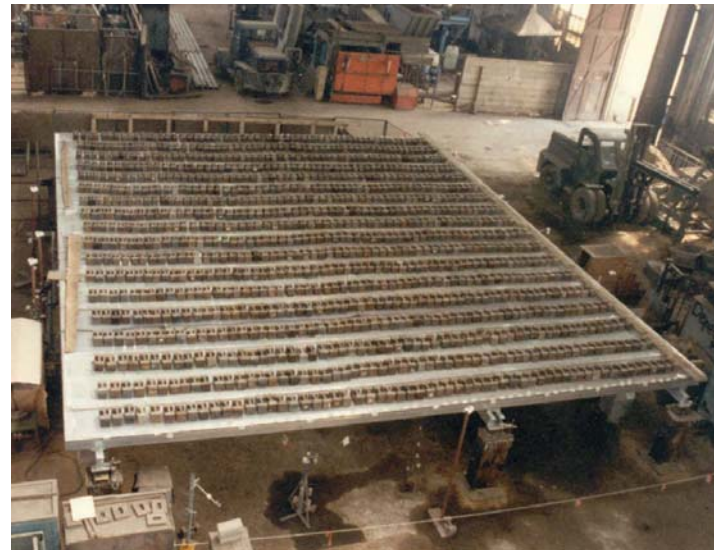
Далее расскажем о монтаже. Он представлял сложную техническую задачу, т. к. нужно было собрать два контура – наружный и внутренний. Периметр наружного опорного контура – более 900 м, а внутреннего контура – около 600 м длиной [4].

Поясним, как собирался наружный опорный контур. На предварительно установленные и выверенные в проектное положение колонны устанавливались монтажные отправочные марки, которые имели длину, соответствующую транспортному габариту, т. е. около 12 м, и высоту не более 3,6 м. Каждый последующий монтажный элемент соединялся с предыдущим при помощи фрикционных соединений на высокопрочных болтах.

Для обеспечения полной сборки наружного опорного контура в овальное кольцо были предусмотрены четыре компенсационных стыка, в которых устранялись неточности монтажа. На рис. 9 показан процесс монтажа наружного опорного контура.

Вернемся к узлу опирания колонны на фундамент и напомним, что он запроектирован и выполнен шарнирным. Узел и общий вид колонны показаны на рис. 10.

а



б

Рис. 7. Испытания узлов и частей БСА: *а* – узел фрикционного соединения монтажных элементов; *б* – испытания светопрозрачной поликарбонатной панели

Fig. 7. Tests of GSA joints and parts: *а* – friction joint of mounting elements; *б* – tests of translucent polycarbonate panel

а **б** **в**

Рис. 8. Монтаж наружного опорного контура: *а* – установка наружного опорного контура на колонны; *б* – верхняя часть колонны; *в* – узел сопряжения колонны с наружным контуром
Fig. 8. Installation of the outer support contour: *а* – installation of the outer support contour on the columns; *б* – the upper part of the column; *в* – column to outer contour joint

Далее перейдем к монтажу и сборке внутреннего контура. Он по проекту имел сложное сечение в виде пространственной фермы, которая состояла из верхнего, двух средних и нижнего поясов, объединенных с помощью крестовой решетки из широкополочных двутавров в единую пространственную систему [4, 7, 8].

Сборка внутреннего контура осуществлялась на специально организованных подмостях, которые показаны на рис. 11. Сборка кольца велась симметрично с двух сторон. Собранный полностью внутренний контур показан на рис. 12 [4, 7, 8].

Возможность неточной сборки поправлялась по данным измерений, которые выполнялись специалистами ООО Фирма «ЮСТАС», представители которой находились на заводе металлоконструкций, где помогали осуществлять контрольную сборку отправочных элементов, и на строительной площадке, а также участвовали в соединении отправочных элементов в овальное сплошное кольцо. Соединение отправочных элементов велось с помощью фрикционных соединений на высокопрочных болтах. Такой тип соединения при монтаже всего каркаса был основным и позволил намного сократить сроки возведения покрытия. Для его осуществления понадобилось 360 тысяч высокопрочных болтов на всем покрытии.

После окончательной сборки внутреннего контура, которая благодаря специалистам ООО Фирма «ЮСТАС» завершилась с прецизионной точностью, идеально совпали отверстия для установки высокопрочных болтов в последнем монтажном стыке, несмотря на то что периметр овального кольца внутреннего контура составлял около 600 м.

Далее полностью собранный внутренний контур весом 4500 кг был поднят на проектную отметку – высоту 50 м. Процесс подъема осуществлялся в течение трех дней при помощи предварительно установленных на специальных стойках мощных домкратов. После достижения внутренним контуром проектной отметки внутренний контур был закреплен на монтажных стойках (рис. 12 и 13).

а

б

Рис. 9. Установка наружного контура на колонны: *а* – колонны покрытия БСА; *б* – наружный опорный контур покрытия БСА

Fig. 9. Installation of the outer contour on the columns: *а* – GSA roof columns; *б* – GSA roof outer support contour

а

б

Рис. 10. Колонна покрытия: *а* – общий вид колонны; *б* – нижняя часть колонны покрытия БСА

Fig. 10. Roof column: *а* – general view of the column; *б* – the lower part of the GSA roof column

Рис. 11. Сборка внутреннего контура на подмостях
Fig. 11. Assembling the inner contour on scaffolds

Рис. 12. Внутренний контур собран
Fig. 12. Inner contour assembled

а б

Рис. 13. Подъем внутреннего контура на проектную отметку
Fig. 13. Lifting the inner contour to the design level

Следующим этапом был монтаж криволинейных радиальных балок, которые одним концом опирались на наружный опорный контур, а другим – на внутренний (рис. 14).

Монтаж радиальных балок осуществлялся в строгой последовательности, чтобы избежать нежелательных деформаций двух контуров.

После установки всех радиальных балок между ними были смонтированы кольцевые фермы. Совокупность всех установленных элементов обеспечивала необходимую жесткость, устойчивость и неизменяемость покрытия БСА. Вид на стадион во время монтажа показан на рис. 15.

Рис. 14. Монтаж криволинейных радиальных балок
Fig. 14. Installation of curved radial beams

После полной сборки каркаса впервые в строительной практике нашей страны проведено устройство светопрозрачной кровли из поликарбоната немецкой фирмы «Макролон». Ее монтаж показан на рис. 16.

На рис. 17 и 18 показаны фасад и интерьер стадиона после возведения покрытия над трибунами [4, 7, 8].

Рис. 15. Вид на покрытие БСА во время монтажа
Fig. 15. View of the GSA roof during installation

а **б**

Рис. 16. Монтаж светопрозрачной кровли: *а* – подъем светопрозрачной панели;
б – монтаж панели на покрытие БСА
Fig. 16. Installation of the translucent roof: *а* – lifting of a translucent panel; *б* – installation of a panel on the GSA roof

Рис. 17. Фасад стадиона после возведения покрытия
Fig. 17. The stadium facade after the erection of the roof

Рис. 18. Интерьер стадиона после возведения покрытия над трибунами БСА
Fig. 18. The stadium interior after the erection of the roof over the GSA stands

Реконструкция стадиона к Кубку мира 2018 года

Следующий этап в истории стадиона «Лужники» – это реконструкция стадиона к чемпионату мира по футболу в 2018 году в России. Стадион был выбран главной ареной чемпионата, на которой должны быть проведены матчи открытия и финала.

Однако он не удовлетворял строгим требованиям FIFA для проведения таких мероприятий. Для этого нужно было провести реконструкцию. Назовем отдельные требования, которым не удовлетворял стадион:

– вместимость. Она должна была составлять 89 тысяч зрителей;

– расстояние в плане от углового флажка до крайнего ряда должно составлять 190 м для обеспечения максимальной комфортности и видимости для зрителей при проведении спортивных мероприятий. На стадионе эта величина была 240 м;

– ширина ступени гребенки трибун должна составлять 80 см для свободного прохода зрителей к своему месту;

– отсутствие скай-боксов, в которых располагались VIP-места для зрителей;

– отсутствие на стадионе зон для прессы и другие требования, которые мы не будем здесь перечислять.

Требование по вместимости удалось решить в результате переговоров московской администрации с президентом FIFA. Оно было снижено до 80 тысяч зрителей.

В ходе подготовки к реконструкции предлагалось либо снести существующий стадион и на его месте построить новый, либо демонтировать старое покрытие и заменить его новым. Варианты реконструкции приведены на рис. 19.

Однако нынешний стадион является одним из символов города Москвы, находится на золотой оси города, на нем было проведено множество знаковых спортивных мероприятий. Поэтому удалось убедить руководство города оставить неизменным его внешний вид. В этом большую роль кроме автора статьи сыграли нынешний директор ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко И. И. Ведяков, известные специалисты нашего института М. Р. Урицкий, П. Д. Одесский, П. Г. Еремеев при поддержке вице-президента РААСН В. И. Травуша.

Рис. 19. Варианты реконструкции стадиона «Лужники»
Fig. 19. Options for the reconstruction of the Luzhniki Stadium

Авторами реконструкции являлись: архитекторы, работающие в ООО «Спич», А. А. Шубкин, С. О. Кузнецов и А. Э. Чобан. Инженеры реконструкции стадиона «Лужники» – сотрудники ООО «Метрополис» А. В. Любарцев и А. Е. Кущенко; сотрудник ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» М. И. Фарфель.

Реконструкция заключалась в сохранении существующего стального купольного покрытия с увеличением его площади и фасадных трибун, а также полной заменой трибун с удовлетворением требований FIFA при сохранении несущей способности несущих конструкций, что представляло собой сложную инженерную задачу, которая была успешно решена [5, 10].

Устойчивость покрытия была обеспечена установкой крестовых трубчатых связей между колоннами стадиона (рис. 20).

На рис. 21 показан демонтаж старых трибун. Для обеспечения устойчивости исторической фасадной стены в последних пролетах старых трибун установлены временные вертикальные связи (рис. 22).

Для определения нагрузок от снега и ветра проведены продувки модели реконструируемого покрытия в аэродинамической трубе ООО «Фирма «Уникон» М. М. Березиным и М. А. Березиным (рис. 23), которые использовались при проведении прочностных расчетов нового покрытия [11], по результатам которых специалистами ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство» И. В. Лебедевой и Д. С. Богачевым составлены рекомендации по назначению этих нагрузок.

Рис. 20. Временные вертикальные связи для обеспечения устойчивости покрытия БСА
Fig. 20. Temporary vertical braces to ensure the stability of the GSA roof

Рис. 21. Демонтаж трибун стадиона «Лужники»
Fig. 21. Dismantling of the Luzhniki Stadium stands

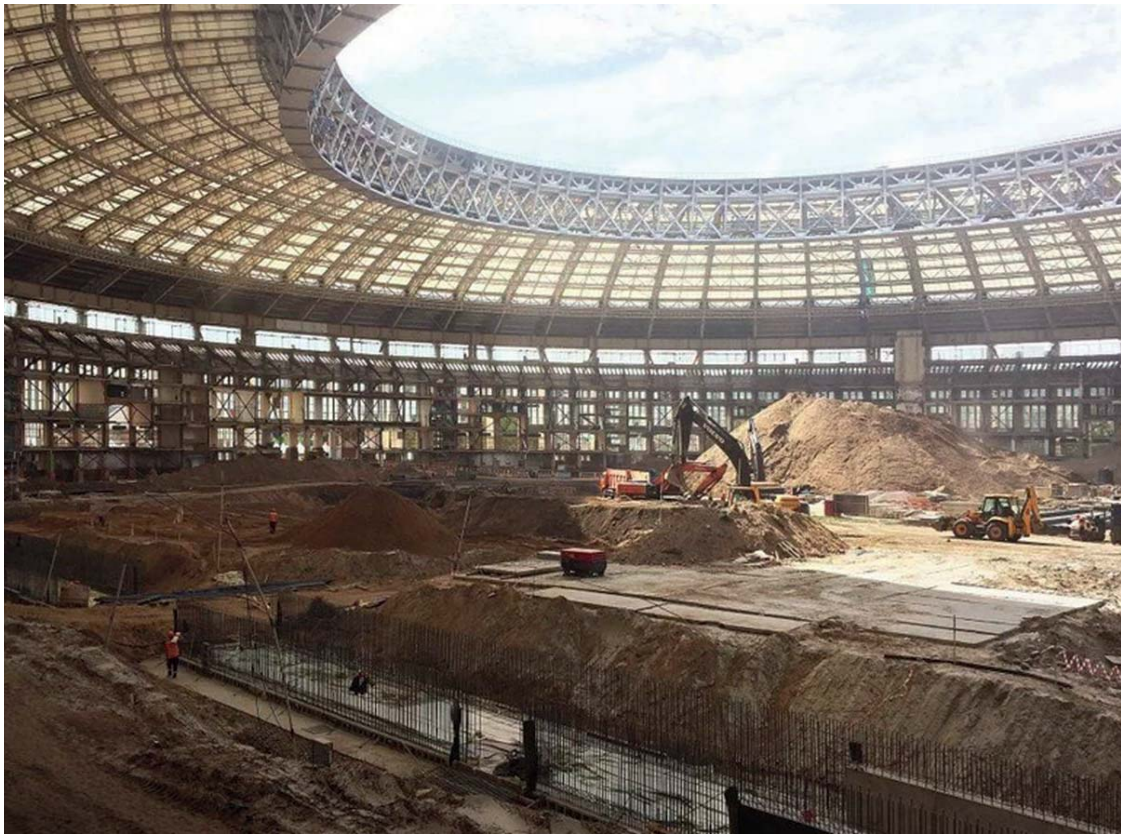


Рис. 22. Меры по обеспечению устойчивости исторической фасадной стены
Fig. 22. Measures to ensure the stability of the historic front wall

В ходе выполнения работ по реконструкции были проведены испытания, в которых выяснялось влияние температурных воздействий на несущую способность высокопрочных предварительно напряженных болтов, а также проведены испытания реальных узлов соединения старой части покрытия с новой консольной частью, увеличивающей площадь уникального большепролетного покрытия БСА. Это показано на рис. 24 и 25.

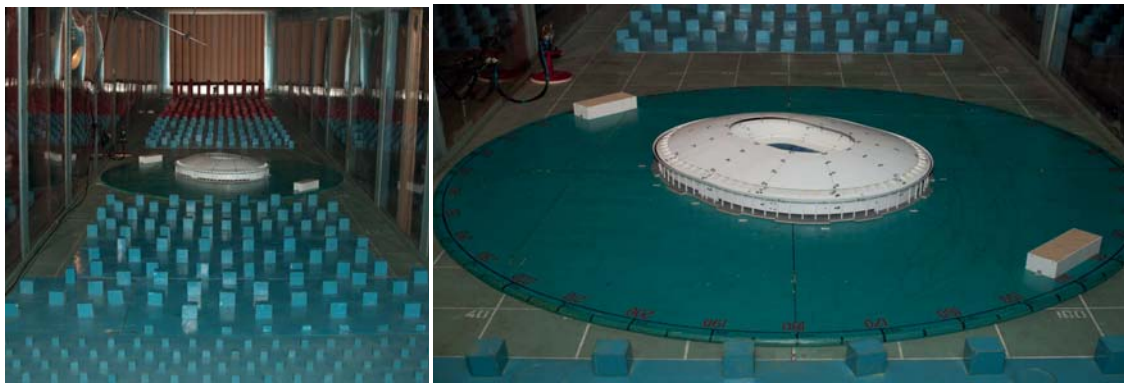


Рис. 23. Испытание модели в аэродинамической трубе для определения снеговых и ветровых нагрузок
Fig. 23. Wind tunnel testing of the model to determine snow and wind loads

а **б**

Рис. 24. Испытания влияния температуры на несущую способность высокопрочных болтов: *а* – сварка модели элемента, позволяющего увеличить площадь покрытия БСА; *б* – проверка натяжения высокопрочных болтов
Fig. 24. Testing the effect of temperature on the load-bearing capacity of high-strength bolts: *a* – welding of the model of the element to increase the coverage area of the GSA; *б* – testing of the tension of high-strength bolts

Рис. 25. Испытания реального узла соединения консольной части покрытия с существующей частью покрытия БСА
Fig. 25. Testing the real joint of the cantilever part of the roof with the existing part of the GSA roof

В проведении испытаний, обследовании покрытия перед проведением монтажа, научно-техническом сопровождении реконструкции на стадии изготовления, монтажа и осуществлении реконструкции трибун, при сохранении исторической фасадной стены стадиона, принимали участие специалисты ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко М. И. Гукова, Д. Ю. Коняшин, Д. В. Кондрашов, С. В. Гуров, О. И. Пономарев, А. А. Минасян.

На рис. 26 показан консольный элемент, увеличивающий площадь покрытия БСА, и его вид при сборке в кондукторе. Установленные на покрытие элементы консольной части показаны на рис. 27.

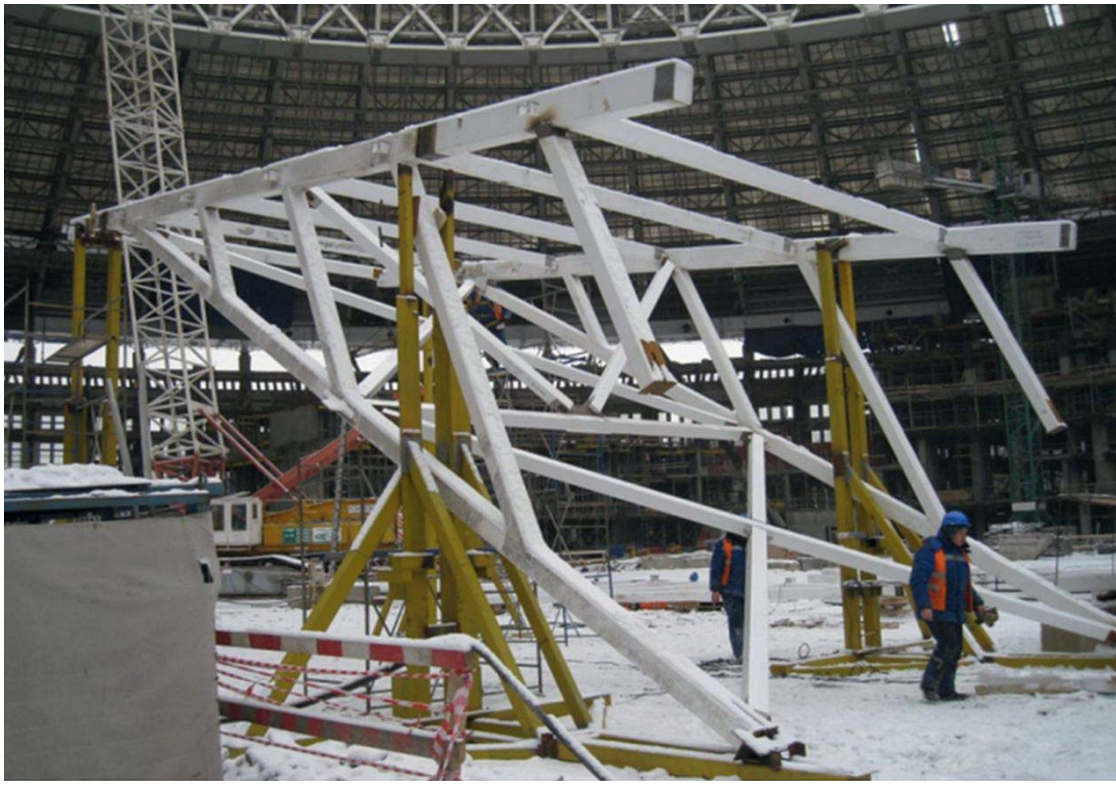


Рис. 26. Консольный элемент, увеличивающий площадь покрытия БСА, в кондукторе
Fig. 26. Cantilever element increasing the coverage area of the GSA in the jig

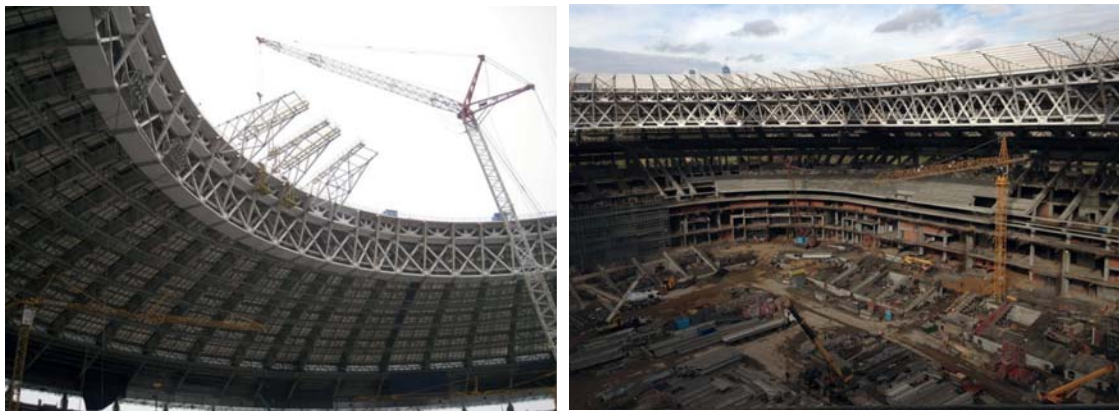


Рис. 27. Монтаж консольной части покрытия БСА
Fig. 27. Installation of the cantilever part of the GSA roof

В процессе реконструкции осуществлялся мониторинг напряженно-деформированного состояния элементов покрытия по специально разработанной в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко системе. Приборы системы защищены патентом. Этот процесс показан на рис. 28, где изображено проведение измерений непосредственно на самом покрытии и на временных вертикальных связях [6]. Продолжаются работы по мониторингу деформированного состояния

покрытия под руководством и непосредственно специалистами ООО Фирма «ЮСТАС» А. И. Вдовенко, М. В. Марковым, А. Р. Артемьевым, Я. В. Грицишиным.

Стадиону «Лужники» Европейской международной федерацией (УЕФА) присвоен статус «Элит». Он признан одним из лучших стадионов по комфортности в мире (по оценке президента международной федерации Д. Инфантино). Сертификат изображен на рис. 29.

Окончательный вид реконструированных трибун показан на рис. 30.

Также во время реконструкции была проведена полная замена кровли из поликарбоната на новую. Она не поддерживает горение, снижает величину инфракрасного излучения и изготовлена фирмой «Макролон», которая изготавливала поликарбонат при сооружении покрытия БСА, что изображено на рис. 31.

Вид стадиона и его интерьер после проведения реконструкции показан на рис. 32 [4, 5, 10].

Рис. 28. Измерение напряжений при проведении реконструкции стадиона «Лужники»
Fig. 28. Stress measurements during the reconstruction of the Luzhniki Stadium

Рис. 29. Документ, подтверждающий присвоение стадиону «Лужники» статуса «Элит»
Fig. 29. Document confirming the assignment of the Elite status to the Luzhniki Stadium

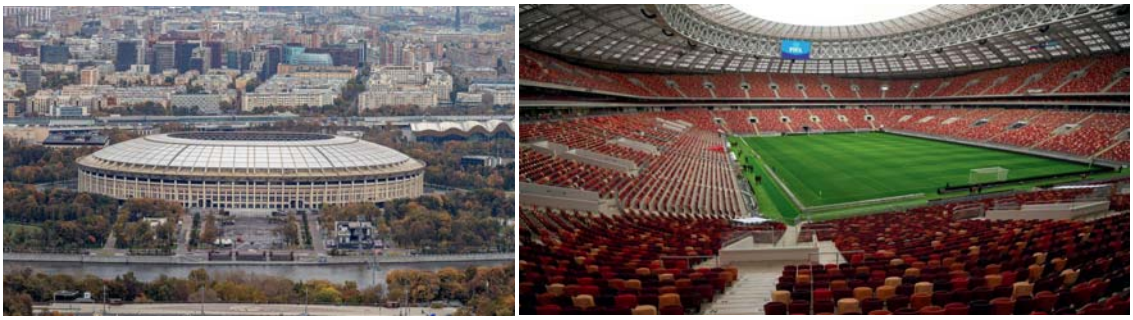
Рис. 30. Смонтированные трибуны стадиона, удовлетворяющие требованиям FIFA
Fig. 30. Installed Stadium stands that meet FIFA requirements

Рис. 31. Установка новых светопрозрачных панелей из поликарбоната
Fig. 31. Installation of new translucent polycarbonate panels

Одной из новых архитектурных особенностей реконструируемого покрытия явилось устройство медиакровли, работу которой можно оценить, рассматривая рис. 33.

Фасад стадиона во время проведения Кубка мира приведен на рис. 34.

На рис. 35 показаны церемонии открытия и финала матчей чемпионата мира по футболу 2018 года, состоявшиеся на Большой спортивной арене стадиона «Лужники».



а **б**

Рис. 32. Фасад (*а*) и интерьер (*б*) реконструированного стадиона, который удовлетворяет требованиям FIFA для стадионов, на которых проводятся матчи открытия и финала Кубка мира по футболу
Fig. 32. Facade (*a*) and interior (*б*) of the reconstructed stadium, which meets FIFA requirements for the stadiums hosting the opening and final matches of the FIFA World Cup

Рис. 33. Медиакровля на реконструированном покрытии БСА
Fig. 33. Media screen on the reconstructed GSA roof

Рис. 34. БСА во время проведения Кубка мира по футболу
Fig. 34. GSA during the FIFA World Cup

а

б

Рис. 35. Матчи Кубка мира по футболу 2018 года: *а* – матч открытия чемпионата мира; *б* – финальный матч чемпионата мира
Fig. 35. 2018 FIFA World Cup matches: *а* – World Cup opening match; *б* – World Cup final match

Рис. 36. Вручение Кубка мира по футболу победителю чемпионата президентом РФ В. В. Путиным
Fig. 36. Awarding the winner of the championship with the FIFA World Cup by Russian President Vladimir Putin

Рис. 37. Торжественное закрытие Кубка мира по футболу
Fig. 37. Closing ceremony of the FIFA World Cup

На рис. 36 изображено вручение Кубка мира по футболу победителю турнира, сборной Франции, президентом РФ В. В. Путиным, а на рис. 37 показан праздничный салют, состоявшийся во время закрытия соревнований.

Выводы

Принципы реконструкции стадиона большой вместимости на примере усовершенствования Большой спортивной арены стадиона «Лужники» можно использовать для удовлетворения требований FIFA на других аренах с вместимостью не менее 80 000 зрителей, чтобы на них можно было проводить матчи открытия и финала Кубка мира по футболу и другие знаковые спортивные мероприятия по футболу, в том числе финал Лиги чемпионов и матчи чемпионата Европы, включая его финал.

Список литературы

1. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* (с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4) [интернет]. Режим доступа: https://tk-expert.ru/uploads/files/docs/%D0%A1%D0%9F%20%D0%9D%D0%90%D0%93%D0%A0%D0%A3%D0%97%D0%9A%D0%98%20%D0%92%D0%9E%D0%97%D0%94%D0%95%D0%99%D0%A1%D0%A2%D0%92%D0%98%D0%AF%20%D0%90%D0%9A%D0%A2%D0%A3%D0%90%D0%9B%D0%98%D0%97%D0%98%D0%A0%D0%9E%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%9D%D0%90%D0%AF%20%D0%A0%D0%95%D0%94%D0%90%D0%9A%D0%A6%D0%98%D0%AF%20%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9F%2002.01.07-85%20%D0%A1%D0%9F%2020.13330.2016%202022-05-30.pdf

2. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4 и № 5) [интернет]. Режим доступа: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=54&DocOnPageCount=100&page=1&id=217968

3. СП 294. 1325800.2017. Конструкции стальные. Правила проектирования [интернет]. Режим доступа: https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/fff/konstruktsii-stalnye.pdf

4. *Алешин В.В., Баранов Д.С., Беликов Ю.М., Берклайд М.М., Бобряшов В.В., Бобряшов В.М. и др.* Покрытие Большой спортивной арены стадиона «Лужники» (проектирование, научные исследования и строительство). Москва: Фортэ; 1998.

5. *Фарфель М.И., Гукова М.И., Коняшин Д.Ю., Кущенко А.Е., Любарцев А.В.* Особенности реконструкции Большой спортивной арены стадиона «Лужники» к Чемпионату мира по футболу в 2018 году. Вестник НИЦ «Строительство». 2017;(3):74–92.

6. *Фарфель М.И.* Обеспечение безаварийной эксплуатации уникального большепролетного покрытия Большой спортивной арены олимпийского стадиона «Лужники». Строительная механика и расчет сооружений. 2012;(6):56–61.

7. *Микулин В.Б., Фарфель М.И. Ханджи А.В.* Покрытие Большой спортивной арены Олимпийского комплекса в Лужниках. В: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко 80 лет. Москва: ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко; 2007, с. 46–55.

8. *Mikulin V.B., Khandzhi A.V.* Design and construction of mayor sports arena in Luzhniki. Moscow. In: Spatial structures in new and renovation projects of buildings and construction: Theory, investigations, design, erection: Proceedings: Intern. congr. ICSS-98, June 22–26, 1998. Moscow; 1998, pp. 113–114.

9. *Микулин В.Б., Попов Н.А., Отставнов В.А., Фарфель М.И.* Расчет покрытия Большой спортивной арены Олимпийского комплекса «Лужники». Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2003;(6):38–42.

10. *Ведяков И.И., Фарфель М.И.* Научно-техническое сопровождение проектирования, изготовления и монтажа и эксплуатации при реконструкции Большой спортивной арены «Лужники» в г. Москве к Чемпионату мира по футболу в 2018 году. Вестник НИЦ «Строительство». 2019;22(3):27–41.

11. *Лебедева И.В., Фарфель М.И., Коняшин Д.Ю., Березин М.М.* Экспериментальное исследование распределения снеговых нагрузок на покрытии Большой спортивной арены «Лужники». Вестник НИЦ «Строительство». 2022;35(4):40–61. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-40-61

References

1. SP 20.13330.2016. Loads and actions. Updated version of SNiP 2.01.07-85* (with Changes No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4) [internet]. Available at: https://tk-expert.ru/uploads/files/docs/%D0%A1%D0%9F%20%D0%9D%D0%90%D0%93%D0%A0%D0%A3%D0%97%D0%9A%D0%98%20%D0%92%D0%9E%D0%97%D0%94%D0%95%D0%99%D0%A1%D0%A2%D0%92%D0%98%D0%AF%20%D0%90%D0%9A%D0%A2%D0%A3%D0%90%D0%9B%D0%98%D0%97%D0%98%D0%A0%D0%9E%D0%92%D0%90%D0%9D%D0%9D%D0%90%D0%AF%20%D0%A0%D0%95%D0%94%D0%90%D0%9A%D0%A6%D0%98%D0%AF%20%D0%A1%D0%9D%D0%98%D0%9F%2002.01.07-85%20%D0%A1%D0%9F%2020.13330.2016%202022-05-30.pdf (in Russian).

2. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81* (with Changes No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4 and No. 5) [internet]. Available at: https://protect.gost.ru/document.aspx?control=7&baseC=101&RegNum=54&DocOnPageCount=100&page=1&id=217968 (in Russian).

3. SP 294. 1325800.2017. The construction of steel. Design rules [internet]. Available at: https://minstroyrf.gov.ru/upload/iblock/fff/konstruktsii-stalnye.pdf (in Russian).

4. *Aleshin V.V., Baranov D.S., Belikov Yu.M., Berklaid M.M., Bobryashov V.V., Bobryashov V.M. et al.* Covering of the Large Sports Arena of the Luzhniki Stadium (design, research and construction). Moscow: Forte Publ.; 1998. (In Russian).
5. *Farfel M.I., Gukova M.I., Konyashin D.Yu., Kuschenko A.E., Lyubarsky A.V.* Particular of the reconstruction of the Grand Arena of the stadium "Luzhniki" to the football World Cup in 2018. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2017;(3):74–92. (In Russian).
6. *Farfel M.I.* Ensuring trouble-free operation of the unique long-span covering of the Large Sports Arena of the Olympic stadium "Luzhniki". Stroitel'naya mekhanika i raschet sooruzhenii = Structural Mechanics and Analysis of Constructions. 2012;(6):56–61. (In Russian).
7. *Mikulin V.B., Farfel M.I. et al.* Covering the Large sports arena of the Olympic Complex in Luzhniki. In: V.A. Koucherenko TSNIISK. 80 years old. Moscow: V.A. Koucherenko TSNIISK; 2007, pp. 46–55. (In Russian).
8. *Mikulin V.B., Khandzhi A.V.* Design and construction of mayor sports arena in Luzhniki. Moscow. In: Spatial structures in new and renovation projects of buildings and construction: Theory, investigations, design, erection: Proceedings: Intern. congr. ICSS-98, June 22–26, 1998. Moscow; 1998, pp. 113–114.
9. *Mikulin V.B., Popov N.A., Postnov V.A., Farfel M.I.* Calculation of the coverage of the Large sports arena of the Olympic complex "Luzhniki". Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety. 2003;(6):38–42. (In Russian).
10. *Vedyakov I.I., Farfel M.I.* Scientific and technical support of design, manufacture, installation and operation during the reconstruction of Grand Sports Arena "Luzhniki" in Moscow to the football World Cup in 2018. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2019;22(3):27–41. (In Russian).
11. *Lebedeva I.V., Farfel M.I., Konyashin D.Yu., Berezin M.M.* Experimental study of snow load distribution on a shell of the Grand Sports Arena of Luzhniki Olympic Complex. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;35(4):40–61. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-40-61

Информация об авторе / Information about the author

Михаил Иосифович Фарфель, канд. техн. наук, заведующий лабораторией нормирования, реконструкции и мониторинга уникальных зданий и сооружений ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ «Строительство»; доцент кафедры металлических и деревянных конструкций НИУ МГСУ, Москва
e-mail: farfelmi@yandex.ru
тел.: +7 (499) 170-10-87
Mikhail I. Farfel, Cand. Sci. (Engineering), Head of the Laboratory of Reconstruction, Standardization, and Monitoring of Unique Buildings and Structures, TSNIISK named after V.A. Koucherenko, JSC Research Center of Construction; Associate Prof., Department of Metal and Wooden Structures, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: farfelmi@yandex.ru
tel.: +7 (499) 170-10-87

УДК 624.072.2.014
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-106-127 EDN: SWZSNW

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВАРИЙНЫХ СИТУАЦИЙ ПРИ СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

М.В. МАРКОВ
А.Р. АРТЕМОВ
А.И. ВДОВЕНКО✉
ООО Фирма «ЮСТАС», Рублевское шоссе, д. 109, к. 5, г. Москва, 112252, Российская Федерация

Аннотация

Введение. В статье рассказывается о ситуациях, когда происходят нарушения в геометрии в строящихся, а также уже введенных в эксплуатацию зданиях и сооружениях, при этом повышается риск возникновения аварийной ситуации. Также в работе показываются причины возникновения задачи по контролю геометрии на соответствие ее проектной форме и стабильности, возможного влияния отклонения проектной геометрии на соседние здания и сооружения.

Цель: проанализировать и описать применение геодезических методов для предотвращения возникновения аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений.

Материалы и методы. Приведены способы и методы измерений деформированного состояния зданий при помощи современных роботизированных тахеометров, инклинометров, спутникового оборудования, а также при использовании гидростатического нивелирования, которые позволяют получать надежные и достоверные параметры деформированного состояния строительных конструкций как при статических, так и динамических воздействиях на здание или сооружение.

Результаты. Объяснены принципы работы систем измерений с использованием геодезических автоматизированных систем наблюдения. Приведен процесс определения перемещений и прогибов при монтаже большепролетных покрытий уникальных зданий. К ним относятся стальной стержневой купол стадиона «Лужники» в г. Москве, имеющий наибольший безопорный пролет для сооружений такого класса, равный 310 м, большепролетное трансформированное покрытие стадиона «Газпром Арена» в г. Санкт-Петербурге, большепролетное покрытие стадиона «Казань Арена» в г. Казани. Определены прогибы и перемещения контрольных точек стальной пирамиды для церемонии открытия этого стадиона. Также приведены методы определения параметров деформированного состояния при возведении Центра художественной гимнастики в Лужниках, при строительстве линий метрополитена в г. Москве и, кроме этого, при сооружении участка «Каширская» – «Карачарово» кольцевой железной дороги г. Москвы. Для всех приведенных объектов разработаны и внедрены методики проведения измерений.

Выводы. Приведенные методы измерений, позволяющие определять горизонтальные перемещения и прогибы, успешно используются при проведении мониторинга деформированного состояния зданий и сооружений, что позволяет увеличить их надежность и безопасность в режимах строительства и эксплуатации.

Ключевые слова: мониторинг деформированного состояния конструкции, роботизированный тахеометр, горизонтальные перемещения, вертикальные прогибы, автоматизированная система мониторинга,

инклинометры, гидростатический нивелир, лазерное сканирование, проектная геометрия строительной конструкции, призменные отражатели

Для цитирования: Марков М.В., Артемов А.Р., Вдовенко А.И. Применение геодезических методов для предупреждения возникновения аварийных ситуаций при строительстве и эксплуатации зданий и сооружений. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):106–127. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-106-127

Вклад авторов
Авторы внесли равноценный вклад в подготовку публикации.

Финансирование

Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 28.06.2023
Поступила после рецензирования 20.07.2023
Принята к публикации 25.07.2023

APPLICATION OF GEODETIC METHODS FOR PREVENTING EMERGENCIES IN THE CONSTRUCTION AND OPERATION OF BUILDINGS AND STRUCTURES

M.V. MARKOV
A.R. ARTEMOV
A.I. VDOVENKO✉
EUSTACE Company, Rublevskoe Shosse, 109, bld. 5, Moscow, 112252, Russian Federation

Abstract

Introduction. The paper describes distortions of geometry in buildings and structures under construction as well as those already commissioned, which increase the risk of an emergency. The paper also shows the reasons for controlling the geometry for its compliance with design form and stability, as well as possible impact of deviations in the design geometry on adjacent buildings and structures.

Aim: to analyze and describe the application of geodetic methods for preventing emergencies in the construction and operation of buildings and structures.

Materials and methods. The paper presents methods and techniques for measuring the deformations of buildings using modern robotic tacheometers, inclinometers, satellite equipment, as well as hydrostatic leveling, in order to obtain reliable and valid parameters of the deformed state of building structures under both static and dynamic effects on the building or structure.

Results. The paper explains the operating principles of measuring systems using automatic geodetic monitoring systems. The authors describe the process of determining displacements and deflections during the erection of large-span shells of unique buildings. These include the steel framed dome of the Luzhniki Stadium in Moscow, Russia, which has the largest unsupported span for structures of this class (310 m), large-span transformed shell of the Gazprom Arena Stadium in Saint Petersburg, and large-span shell of the Kazan Arena Stadium in Kazan, Russia. Deflections and displacements of the reference points of the steel pyramid were determined for the Opening Ceremony at the Kazan Arena Stadium. The paper also presents the methods for determining the parameters of deformations during the construction of the Rhythmic Gymnastics Center in Luzhniki, metro lines in Moscow, and Kashirskaya–Karacharovo section of the Moscow ring railroad. Measurement methods have been developed and implemented for all these facilities.

Conclusion. The above measurement methods are successfully used to determine horizontal displacements and deflections for monitoring the deformations of buildings and structures, which increases their reliability and safety during construction and operation.

Keywords: monitoring of the deformation state of the structure, robotic tacheometer, horizontal displacement, vertical deflection, automatic monitoring system, inclinometers, hydrostatic level, laser scanning, design geometry of building structure, prism reflectors

For citation: Markov M.V., Artemov A.R., Vdovenko A.I. Application of geodetic methods for preventing emergencies in the construction and operation of buildings and structures. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):106–127. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-106-127

Author contribution statements
All authors made equal contributions to the study and the publication.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 28.06.2023
Revised 20.07.2023
Accepted 25.07.2023

Целостность здания или сооружения напрямую влияет на безопасность проживающих и окружающих людей. Вовремя не выявленные деформационные процессы негативно сказываются на сроке эксплуатации объекта, разрушают его и могут привести к человеческим жертвам. Геодезический мониторинг позволяет своевременно определить нарушения в возводимой постройке или уже в эксплуатируемом здании и исправить ситуацию, чтобы не произошла авария.

Стандартный периодический контроль за сооружением после его ввода в эксплуатацию, являющийся основой мониторинга напряженно-деформированного состояния (НДС) конструкции, способен определить только те процессы, которые развиваются длительное время. Если по результатам мониторинга выявляется тенденция ускорения перемещений и прогибов, которые могут привести к обрушению зданий в непродолжительное время, то необходима автоматизация геодезического мониторинга. Параметры деформированного состояния, по которым определяется несущая способность здания или сооружения, определяются соответствующими нормативными документами [1, 2].

Автоматизированная система мониторинга измерений предназначена для периодического определения параметров деформированного состояния конструкций, включая обработку выполненных измерений. Программное обеспечение удаленно, из офиса, управляет тахеометром через преобразователи и модемы. Тахеометр или другое средство измерений выполняет измерения углов и расстояний до деформационных марок, наклонов конструкций, изменения превышений и т. д., по которым вычисляются их координаты в пространстве.

Автоматизация контроля – это возможность отслеживать состояние конструкций с любой периодичностью, что позволит вовремя сделать экстренное оповещение.

Автоматизированный деформационный мониторинг можно разделить по системам контроля: геотехнические, геодезические и комбинированные системы.

Рис. 1. Геодезические системы для мониторинга
Fig. 1. Geodetic systems for monitoring

В основе геодезических систем автоматизации (рис. 1) используются датчики для контроля за измерениями координат, контроля точек здания или сооружения; это могут быть инклинометры, тахеометры, спутниковые навигационные приемники и т. д.

Определению подлежат:

– горизонтальные перемещения (сдвиг);
– вертикальные перемещения (осадка);
– крен.

Геотехнические системы (рис. 2) предназначены для мониторинга за физическими величинами: акселерометры, датчики влажности, давления, температуры, тензометры и т. д.

Определению подлежат:

– напряжения в элементах конструкций;
– ускорения;
– вибрации;
– температура;
– линейные смещения.

Комбинированные системы совмещают в себе системы геотехнического и геодезического мониторинга.

Далее мы подробнее остановимся на геодезическом мониторинге.

Рис. 2. Геотехнические системы для мониторинга
Fig. 2. Geotechnical systems for monitoring

Используемое оборудование

Инклинометры

Один из способов определения стабильности геометрии зданий и сооружений – это изменение наклонов площадок, жестко связанных с конструкциями самого объекта контроля. На площадках или соответствующих кронштейнах крепятся электронные уровни (инклинометры) необходимой точности (рис. 3). Изменение отсчетов свидетельствует о наличии деформационных процессов.

В зависимости от свойств наблюдаемого объекта сравнительно просто можно дорабатывать систему, оснащая ее новыми датчиками с разной конструкцией элементов крепления. К достоинствам можно отнести возможность оперативного контроля и сравнительную простоту реализации.

К недостаткам можно отнести: малую базу крепления датчика и возможное влияние сторонних факторов на стабильность отсчета; необходимость тянуть каналы связи и питания к каждому датчику.

Спутниковое оборудование

Еще одним из способов определения стабильности геометрии зданий и сооружений является установка спутниковых систем контроля – спутниковых приемников (рис. 4).

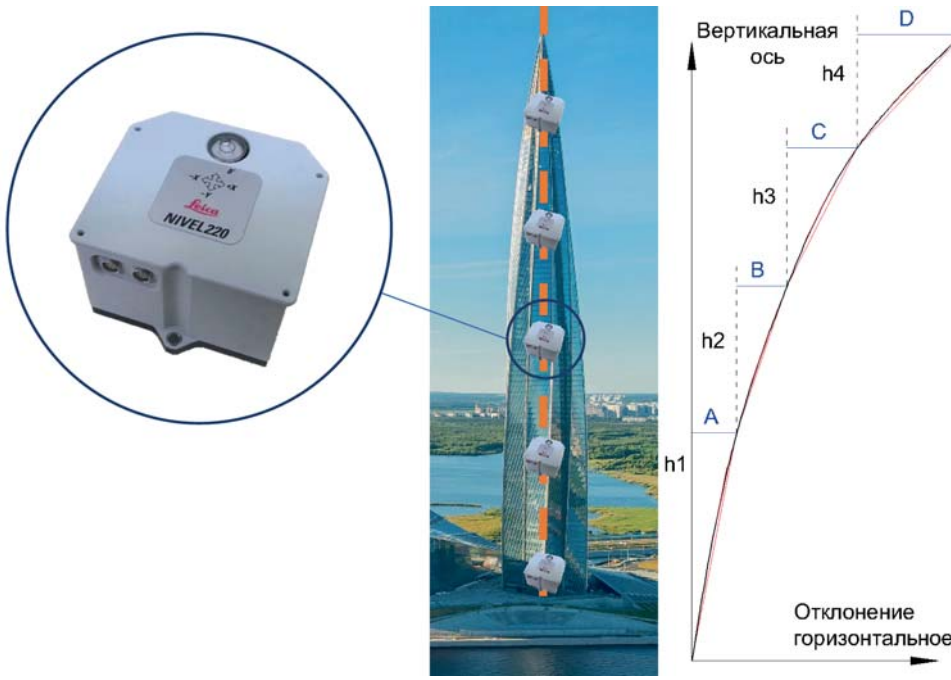


Рис. 3. Использование инклинометров
Fig. 3. Use of inclinometers

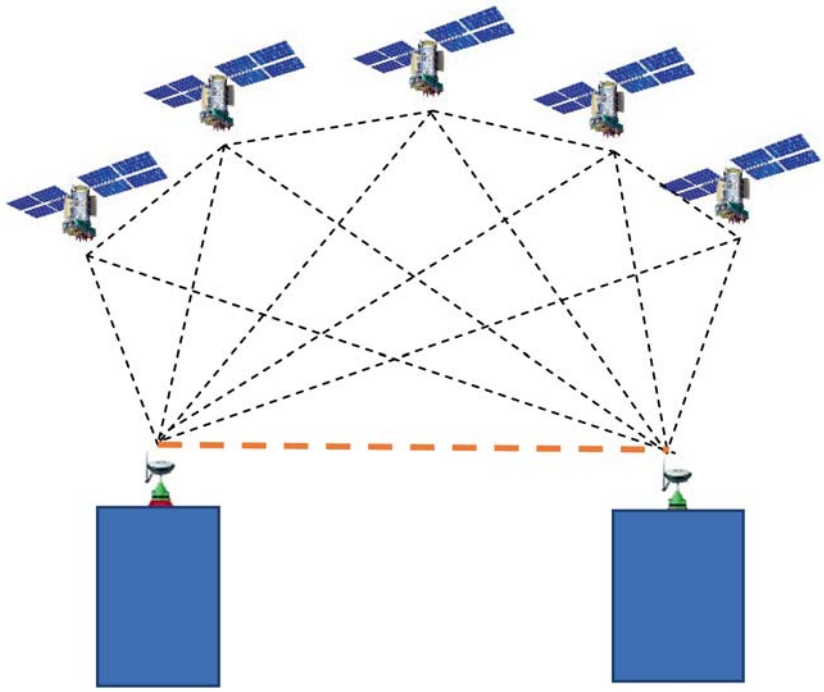


Рис. 4. Использование спутниковых систем
Fig. 4. Use of satellite systems

Изменения относительных спутниковых координат, жестко связанных с конструкциями самого объекта контроля, позволяют судить о наличии или отсутствии деформационных процессов.

Достоинство: возможность оперативного контроля.

К недостаткам можно отнести: высокую стоимость оборудования; необходимость наличия открытого небосвода.

Роботизированные тахеометры

Использование роботизированных тахеометров (рис. 5) при мониторинге стабильности геометрии зданий и сооружений – это наиболее очевидный способ их использования в работе.

Сами измерения заключаются в определении положения специальных контрольных марок в виде триппельпризменных отражателей, закрепляемых на исследуемом объекте. При наличии большого числа собственно контрольных марок использование роботизированных тахеометров наиболее целесообразно.

Метод позволяет определить как плановые, так и высотные деформации.

Точность зависит от расстояния до определяемых марок и условий измерений, от используемого тахеометра, количества приемов измерений.

Этот метод нами используется наиболее часто.

Из недостатков метода можно назвать необходимость наличия прямой видимости между тахеометром и маркой.

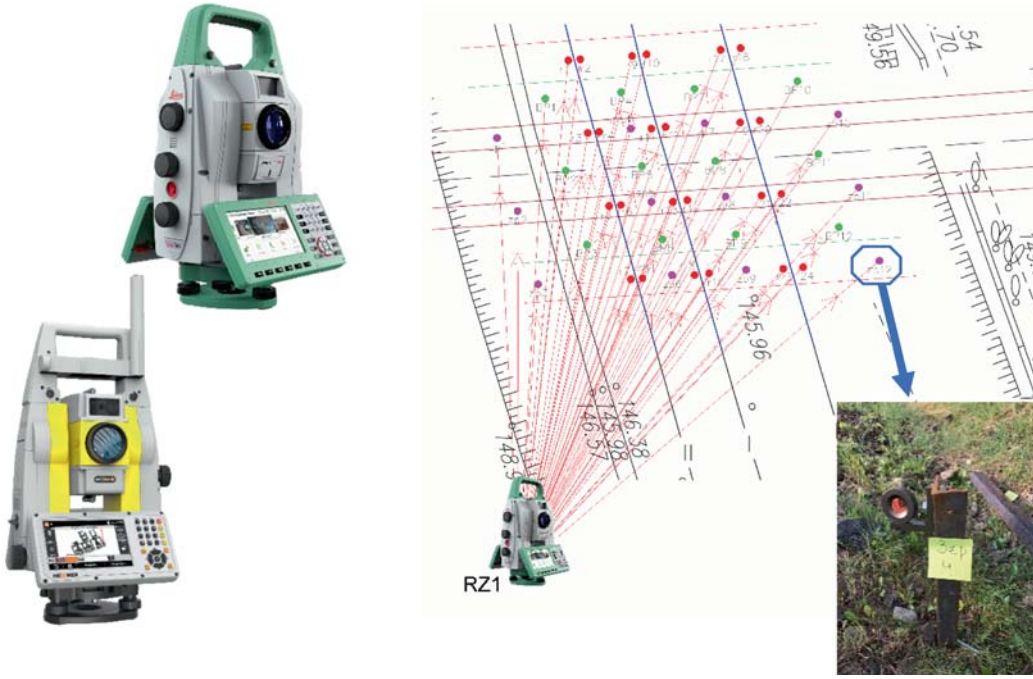


Рис. 5. Использование роботизированных тахеометров
Fig. 5. Use of robotic tacheometers

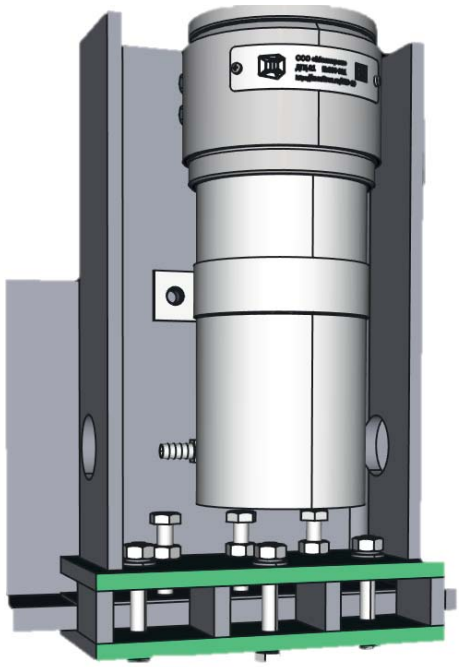


Рис. 6. Гидростатический нивелир
Fig. 6. Hydrostatic level

Гидростатическое нивелирование

Одним из методов определения относительных высотных перемещений является гидростатическое нивелирование.

Преимущества гидростатического нивелирования:

– возможность работы при ограниченной видимости или ее отсутствии;

– высокая точность измерений;

– прямые измерения.

Немного о сути метода. Как известно, в сообщающихся сосудах горизонт неподвижной жидкости (с точностью до постоянства плотности, несжимаемости и т. д.) находится на одном уровне поверхности.

По изменениям превышений между некоторым нулем сосуда и уровнем жидкости можно судить о соответствующих им превышениях между базовыми точками сосудов и соответствующих участков измеряемого объекта.

Из недостатков гидростатического нивелирования можно назвать необходимость

соединения датчиков системой шлангов для рабочей жидкости и воздуха, необходимость установки датчиков примерно в один горизонт или деление их в связанные друг с другом группы.

Данный вид измерений необходимо активно применять при использовании технологии компенсационного нагнетания, он позволяет в реальном времени контролировать деформированное состояние сооружения.

Это позволяет минимизировать деформации, отсутствие которых особенно важно для недопущения аварийных ситуаций или выровнять фундамент, если превышены допустимые деформации.

Примеры выполненных работ на уникальных объектах

Стадион «Газпром Арена»

Футбольный стадион «Газпром Арена» относится к уникальным сооружениям, он имеет пролет более 100 м. Покрытие стадиона впервые в нашей стране выполнено трансформируемым.

Для обеспечения надежности и безопасности уникальных сооружений необходимо проведение соответствующего научно-технического сопровождения (НТС) при проектировании, изготовлении, монтаже и эксплуатации. А также мониторинг напряженно-деформированного состояния элементов металлических конструкций, входящих в состав покрытия.

Для обеспечения безопасности работы покрытия в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко совместно с ООО Фирма «ЮСТАС» разработана и установлена система мониторинга напряженно-деформированного состояния, входящая в состав НТС [3].

Мониторинг деформированного состояния покрытия и трибун выполняется методами инженерной геодезии (рис. 7) и позволяет определять прогибы и горизонтальные перемещения в контрольных точках покрытия. Первично для определения текущего состояния конструкций были выполнены мероприятия по созданию опорной геодезической сети стадиона.

Затем тахеометрами и с помощью лазерного сканирования были выполнены измерения конструкций (рис. 8). Эти действия позволили охватить практически 100 % конструкций покрытия стадиона и определить их текущее положение относительно момента до раскружаливания конструкций.

На стадионе «Газпром Арена» разработана и установлена автоматизированная система мониторинга деформированного состояния, позволяющая шесть раз в день измерять горизонтальные и вертикальные перемещения конструкций (рис. 9), которая может быть перенастроена в случае аварийных ситуаций на цикл измерений один раз в 15 минут. Система состоит из двух тахеометров Leica TS60 и 108 *L*-образных призменных отражателей, комплекса программного обеспечения, позволяющего записывать данные и передавать их по каналам связи. По результатам измерений она позволяет строить деформированные схемы в плане и на разрезах. Отметим, что данная система впервые установлена для слежения за работой большепролетных строительных конструкций с учетом требований по точностям ГОСТ 24846-2019 [1].

Система мониторинга НДС позволяет выявлять возможные нештатные ситуации, возникающие в процессе эксплуатации, для оценки их опасности и принятия мер по их устранению.

На основании полученных результатов определяется техническое состояние объекта, что позволяет выдавать разрешения на безопасное проведение спортивных и концертных мероприятий, проводимых на стадионе.

Рис. 7. Выполнение геодезических работ
Fig. 7. Geodetic works

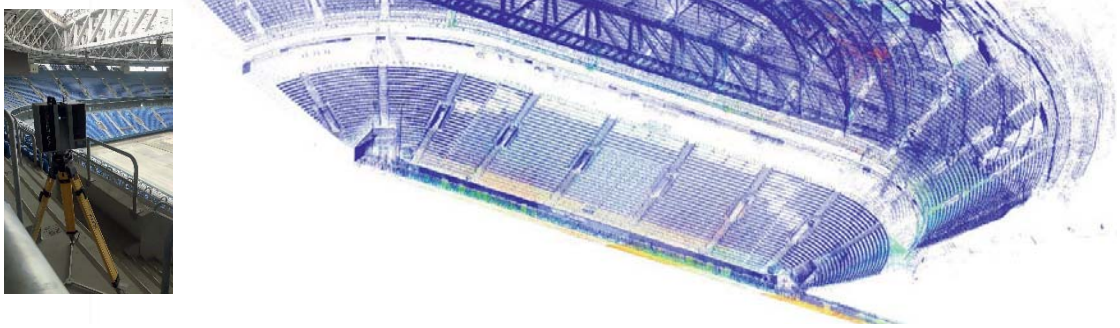


Рис. 8. Результат лазерного сканирования конструкций покрытия
Fig. 8. Result of laser scanning of shell structures

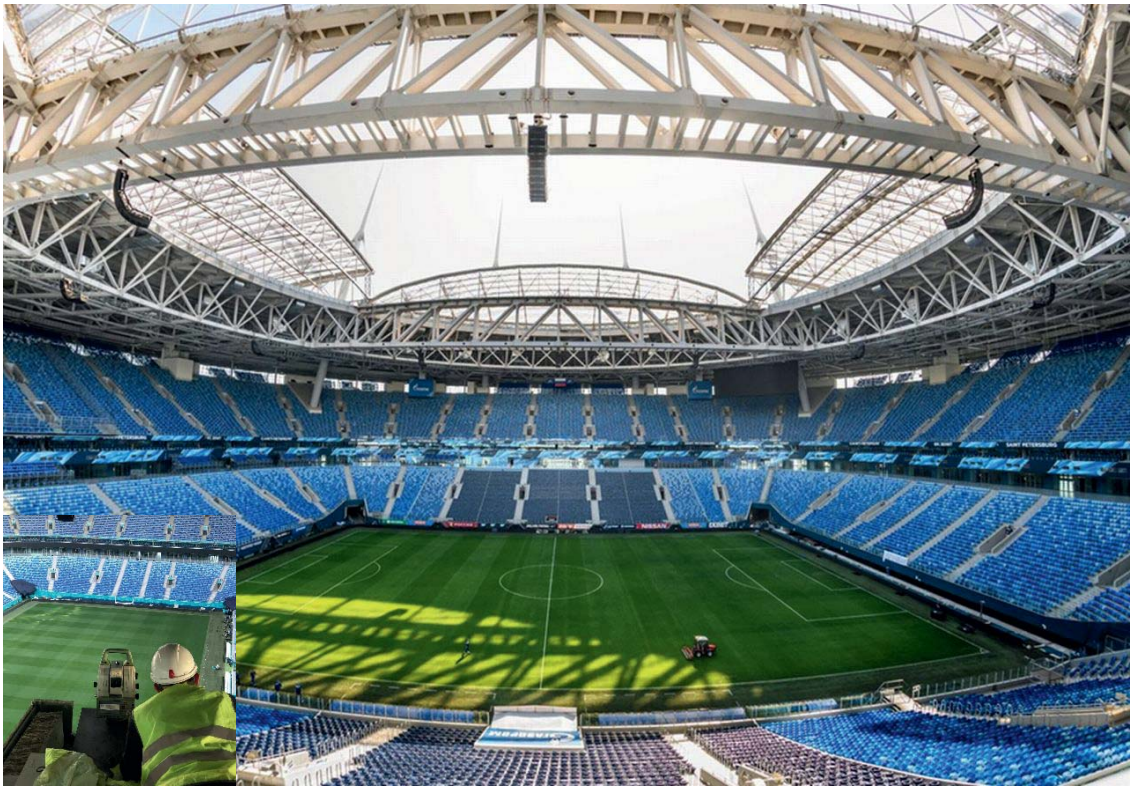


Рис. 9. Настройка системы мониторинга
Fig. 9. Setting up of the monitoring system

Большая спортивная арена «Лужники»

На этом объекте специалисты ООО Фирма «ЮСТАС» участвовали в двух реконструкциях – в 1996 и 2014 годах.

Реконструкция Большой спортивной арены «Лужники», 1996–1997 гг.

В 1996 году начались работы по контролю геометрии конструкции покрытия стадиона БСА «Лужники» на этапах производства, сборки и мониторинга (рис. 10). Внутренний контур собирали из стальных ферм на земле, а затем поднимали на высоту 45 м с помощью четырех гидравлических домкратов в виде стальных рам, на ригеле которых располагались гидравлические домкраты, с помощью которых осуществлялся подъем целиком собранного внутреннего контура весом 4500 тс. Чтобы собрать кольцо на земле, нам пришлось контролировать размеры всех деталей еще на заводах-изготовителях в Белгороде и Челябинске, а на стадионе разбивать стапель и осуществлять контроль за сборкой конструкций в пространственный каркас стального купола. Словом, два года трудов ООО Фирма «ЮСТАС» увенчались успехом: внутренний контур, овальный в плане, периметр которого составлял около 600 м, собрался без единой проблемы.

Вместе со строительством покрытия БСА инженеры ООО Фирма «ЮСТАС» создавали методику наблюдения за ее прогибами и перемещениями в процессе эксплуатации.

Рис. 10. Стадион «Лужники». Реконструкция 1996–1997 гг.
Fig. 10. Luzhniki Stadium. Reconstruction in 1996–1997

Наблюдения начались сразу после раскружаливания весной 1997 года и продолжаются по настоящее время [4].

На внешнем и внутреннем контурах разместили по 8 визирных марок, координаты которых измерялись тахеометром с четырех опорных станций, расположенных на трибунах. Данные измерений передавались в камеральную группу для составления отчетных документов в виде таблиц и схемы. Документы отправляли в ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. Высота внутреннего контура меняется от зимы к лету примерно на 15 см, а овал немного меняет форму. Осадки колонн после первых двух лет практически отсутствуют.

Реконструкция Большой спортивной арены «Лужники», 2014–2017 гг.

ООО Фирма «ЮСТАС» производила следующие работы при реконструкции 2014–2017 гг. [5]:

– по сохранности измерений предыдущих циклов геодезических наблюдений с 1996 по 2014 год;

– по контролю деформаций несущих конструкций внешней стены здания и несущих конструкций покрытия стадиона в процессе реконструкции БСА «Лужники»;

– по обучению специалистов и внедрению автоматизированных комплексов в ООО «МИП-строй № 1».

Работы по измерению деформированного состояния при реконструкции БСА в 2014–2017 годах показаны на рис. 11.

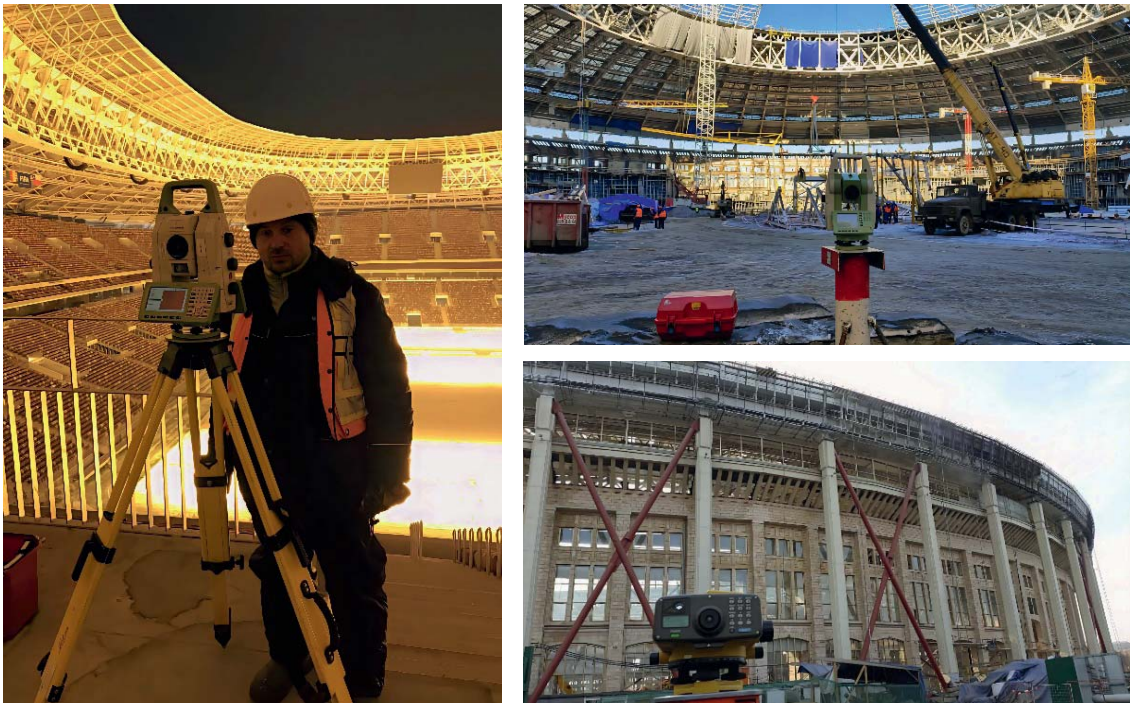


Рис. 11. Стадион «Лужники». Реконструкция 2014–2017 гг.
Fig. 11. Luzhniki Stadium. Reconstruction in 2014–2017

Стадион «Казань Арена»

Сотрудники ООО Фирма «ЮСТАС» приняли активное участие в строительстве стадиона «Казань Арена». Работа делилась на пять этапов:

– контрольные измерения отлитых опорных закладных элементов в основании стадиона под монтаж главного ригеля крыши стадиона г. Казани;

– контроль изготовления сборных элементов главного ригеля на заводе металлических конструкций (ЗМК) в г. Белгороде;

– трехмерная сборка секций главного ригеля из изготовленных элементов на ЗМК в г. Белгороде и на строительной площадке в г. Казани;

– контроль изготовления элементов пирамиды для церемонии открытия и закрытия Универсиады в г. Нижнекамске;

– контроль геометрии главного ригеля после раскружаливания крыши стадиона с помощью трехмерного лазерного сканирования;

– контроль изготовления элементов пирамиды для церемонии открытия и закрытия Универсиады в г. Нижнекамске (рис. 14).

Центр художественной гимнастики в Лужниках 2018–2019 гг.

Центр художественной гимнастики предназначен для соревнований по художественной гимнастике, других спортивных, тренировочных, оздоровительных, а также массовых мероприятий (рис. 16). В общей сложности спорткомплекс сможет принять порядка 4 тыс. зрителей. Конструкции покрытия Центра художественной гимнастики в Лужниках показаны на рис. 17.

Рис. 12. Контроль изготовления сборных элементов главного ригеля на ЗМК в г. Белгороде
Fig. 12. Monitoring of the manufacture of prefabricated elements for the main crossbar at Belgorod Plant

Рис. 13. Трехмерная сборка секций главного ригеля из изготовленных элементов на строительной площадке в г. Казани
Fig. 13. Three-dimensional assembly of sections of the main crossbar from manufactured elements at the construction site in Kazan

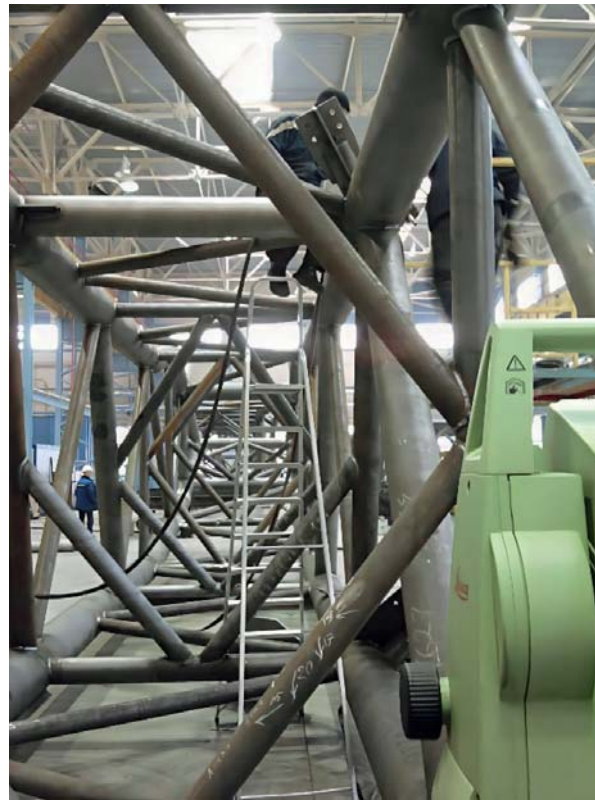


Рис. 14. Контроль изготовления элементов пирамиды для церемонии открытия и закрытия Универсиады на ЗМК в г. Нижнекамске
Fig. 14. Monitoring of the manufacture of pyramid elements for the University Games Opening and Closing Ceremonies at Nizhnekamsk Plant

Рис. 15. Контроль геометрии главного ригеля
Fig. 15. Geometry control of the main crossbar

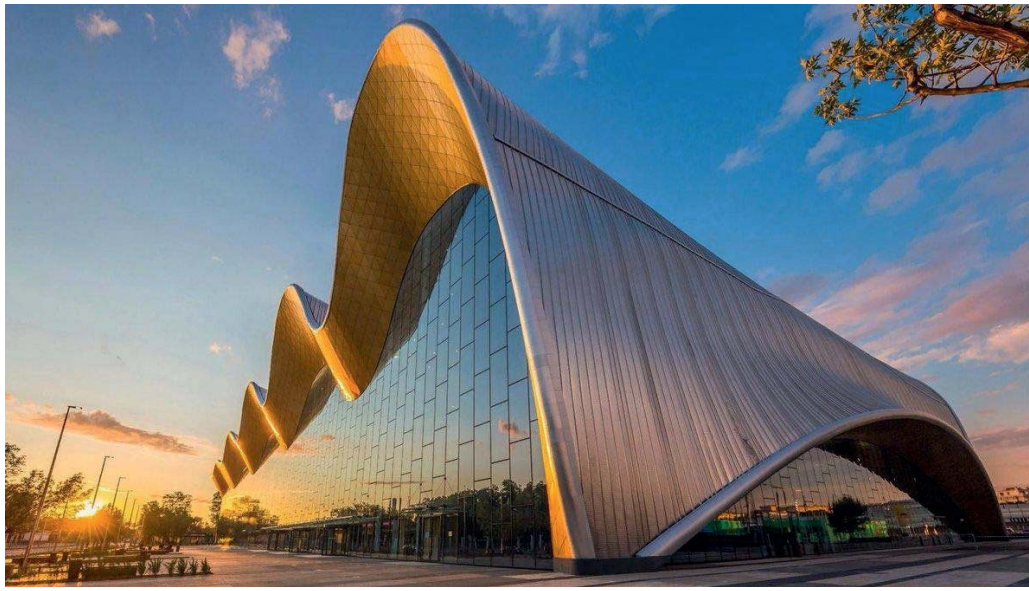


Рис. 16. Общий вид Центра художественной гимнастики в Лужниках
Fig. 16. General view of the Rhythmic Gymnastics Center in Luzhniki

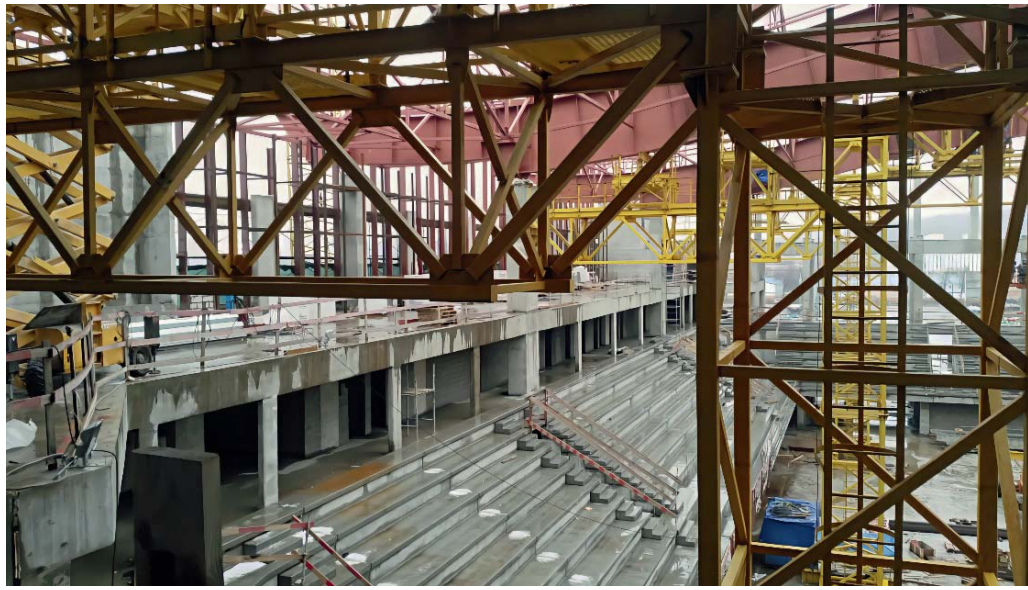


Рис. 17. Конструкции покрытия Центра художественной гимнастики
Fig. 17. Shell structures of the Rhythmic Gymnastics Center

Здание имеет прямоугольную форму в плане с габаритами около 130 на 80 м. Конструкция трибун представляет собой сборные железобетонные элементы Т-образной формы.

Покрытие представляет собой сложную волнообразную форму с переменной кривизной поверхности в обоих направлениях.

Цель выполняемых работ – наблюдение за деформациями основания и конструкции покрытия в процессе строительства и последующей эксплуатации.

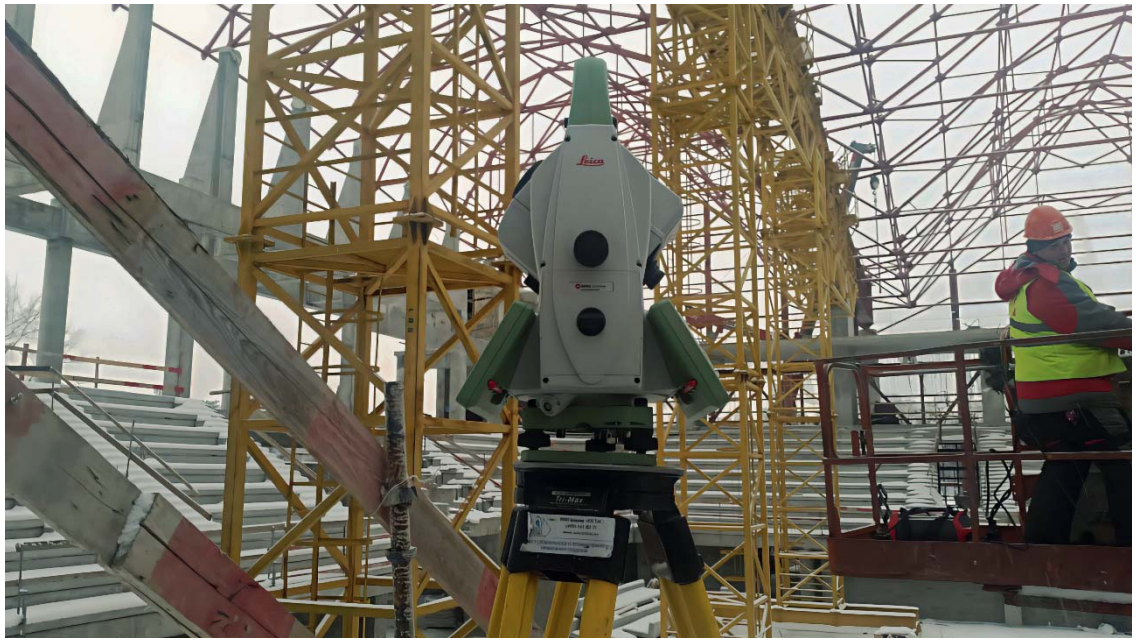


Рис. 18. Центр художественной гимнастики. Выполнение измерений
Fig. 18. Rhythmic Gymnastics Center. Measurements

При выполнении измерений использовались тахеометры Leica TM50, Leica TS60 (рис. 18).

По результатам контроля в полевых условиях с помощью ПО инструмента среднеквадратическая погрешность определения положения измеряемых точек по высоте не превысила 0–6 мм.

Примеры выполненных работ при строительстве метрополитена

При выполнении подобных работ необходимо обеспечить проектную геометрию не только строящихся объектов, но и объектов, попадающих в зону их влияния (рис. 19).

Имеется ряд нюансов, в той или иной мере возникающих при строительстве этих и других сложных объектов:

– высокая плотность застройки надземными и подземными объектами инфраструктуры, введенными в эксплуатацию;

– высокая степень ответственности по предоставлению надежных данных с предельной погрешностью измерений 1 мм;

– высокая частота измерений с выдачей обработанных результатов;

– ограниченный доступ к объектам наблюдения, требующий максимальной автономности систем;

– большая протяженность объектов.

Автоматизированная система мониторинга показала наибольшую эффективность как раз для подобных проектов, когда необходима высокая точность результатов при невозможности или ограниченности присутствия наблюдателя. Для увеличения точности измерений возможно использовать наиболее точное оборудование и многократное повторение приемов измерений.

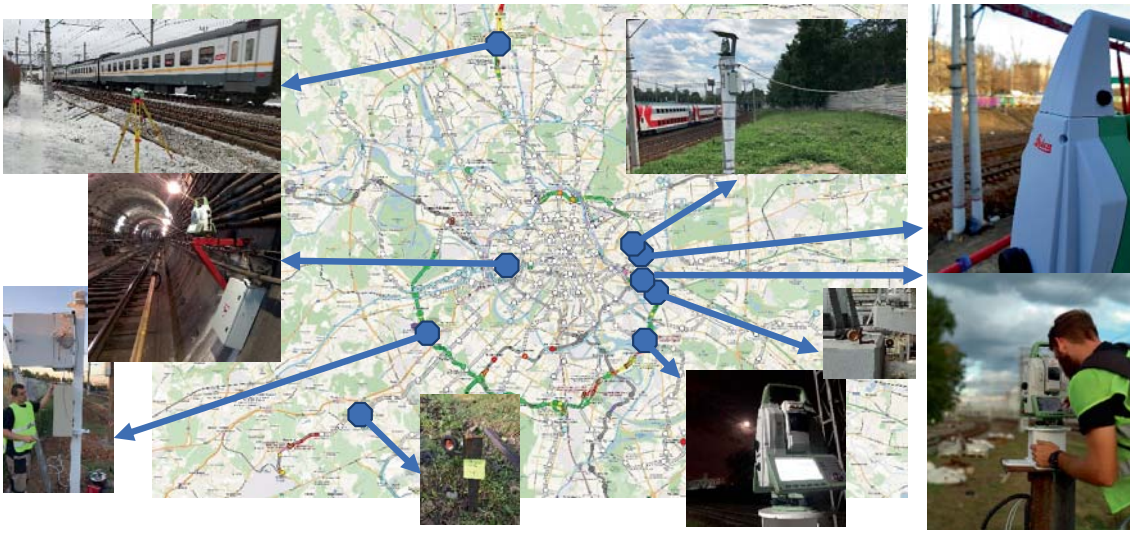


Рис. 19. Примеры выполненных работ при строительстве метрополитена
Fig. 19. Examples of works performed during the construction of the metro

Мониторинг деформированного состояния на объекте «Восточный участок ТПК «Каширская» – «Карачарово»

В зону строительства двухпутного перегонного тоннеля попадает участок железнодорожных путей на перегоне и пути соединительных ветвей кольцевой железной дороги города Москвы. Протяженность объекта – 300 м. Грунт – обводненный песчаный.

Целью работ являлось своевременное информирование заинтересованных лиц актуальными данными измерений для обеспечения безопасности строительства и эксплуатационной сохранности объектов мониторинга, предупреждения развития существующих (при их наличии) повреждений в конструкциях, оценки воздействия нового строительства на объекты мониторинга и сохранности экологической обстановки.

Задачи мониторинга:

– определение абсолютных величин прогибов и перемещений по данным измерений при проведении работ по мониторингу и сравнение их с расчетными (допустимыми) значениями;

– выявление причин возникновения и степени опасности дополнительных прогибов и перемещений для безопасного производства строительно-монтажных работ и нормальной эксплуатации объектов мониторинга;

– принятие своевременных мер по борьбе с возникающими деформациям.

Измерение параметров мониторинга деформированного состояния показано на рис. 20, 21.

Для обеспечения производства работ по геодезическому мониторингу объектов кольцевой железной дороги г. Москвы был выполнен комплекс мероприятий по созданию плановой и высотной деформационной основы: три репера в качестве пунктов плановой деформации и три репера в качестве высотной основы.

Для мониторинга контролируемых параметров было заложено порядка 300 рабочих знаков на рельсовые нити, балластную призму путей, земляное полотно, опоры контактной сети. Точность фиксации величин контролируемых параметров – 1 мм.

Рис. 20. Выполнение измерений
Fig. 20. Measurements

Рис. 21. Мониторинг на объекте «Восточный участок ТПК «Каширская» – «Карачарово»
Fig. 21. On-site monitoring: Kashirskaya–Karacharovo, eastern section of the Third Interchange Contour of the Moscow metro

Цикличность выполнения геодезических наблюдений:

– нулевой цикл – до начала строительных работ;

– 1-й период – при приближении ротора щита на расстоянии 40 м, наблюдения производились каждые 16 ч.;

– 2-й период – при приближении ротора щита на расстоянии 20 м, наблюдения производились каждые 8 ч.;

– 3-й период – при удалении ротора щита на расстоянии 20 м, наблюдения производились каждые 16 ч.;

– 4-й период – до затухания приращения деформации, наблюдения производились один раз в двое суток.

В связи с выходом пенного реагента из балластной призмы на поверхность и верхнее строение пути были согласованы дополнительные циклы измерений с периодичностью один раз в 30 мин.

Итоги четвертого периода наблюдений свидетельствовали о полном затухании деформаций на объекте.

Мониторинг действующих перегонных тоннелей Филевской линии Московского метрополитена

Особенности проекта:

В зону влияния перегонные туннели Филевской линии от станции «Киевская» до станции «Выставочная» попали дважды: при щитовой проходке Третьего пересадочного контура и при сооружении перегонных тоннелей Калининско-Солнцевской линии.

Протяженность перегонных тоннелей, входящих в зону геотехнического мониторинга, – 500 м каждый, и нет прямой видимости, так как участок находится на кривой.

Доступ в перегонный тоннель ограничен ночным окном в 3,5 ч.

Техническое задание на мониторинг предполагало:

– контроль пространственного положения отражателей в обделке тоннеля с точностью 2 мм;

– контроль высотного положения деформационных реперов в путевом бетоне с точностью 1 мм;

– контроль высотного положения верха головок рельсов с точностью 2 мм.

Состав основных наблюдений (рис. 22 и 23):

– ручные геодезические измерения для контроля высотного положения верхнего строения пути. Периодичность достигала 1 раза в день при прохождении ротора щита на расстоянии менее 20 м;

– автоматизированный геодезический мониторинг для контроля сводов тоннеля. Периодичность достигала 1 раза в 2 часа при положении ротора щита на расстоянии менее 20 м.

Автоматизированная система мониторинга показала наибольшую эффективность как раз для подобных проектов, когда необходима высокая точность результатов при невозможности или ограниченности присутствия наблюдателя. Для увеличения точности измерений возможно использовать наиболее точное оборудование и многократное повторение приемов измерений.

Рис. 22. Мониторинг действующих перегонных тоннелей
Fig. 22. Monitoring of existing interstation tunnels

Рис. 23. Мониторинг действующих перегонных тоннелей
Fig. 23. Monitoring of existing interstation tunnels

Малое время для возможности нахождения людей также требует:

– высокой степени ответственности руководителей проекта для обеспечения бесперебойности его исполнения;

– высокого уровня подготовки исполнителей, чтобы уложиться в короткий срок ручных измерений и обеспечить высокую точность измерений.

Стесненность условий измерений и изгиб тоннеля – условия, которые определили установку четырех тахеометров в системе в зоне влияния проходческого щита.

Для учета влияния была разработана программа автоматизированных измерений, в которой координаты точек стояний приборов совместно перевычисляются по опорным точкам перед каждым циклом измерений.

Выводы

Как было сказано ранее, за прошедшие годы ООО Фирма «ЮСТАС» получила огромный опыт в реализации задач контроля геометрии на объектах различного назначения.

За рамками настоящей статьи остались многие реализованные и перспективные проекты, не вписывающиеся в тему статьи или не предназначенные для широкого освещения.

Приведенные методы измерений, позволяющие определять горизонтальные перемещения и прогибы, должны успешно использоваться при проведении мониторинга деформированного состояния зданий и сооружений, что увеличит их надежность и безопасность в режимах строительства и эксплуатации, позволит участвовать в проектах по строительству, реконструкции, эксплуатации объектов различного назначения для совместного решения самых сложных задач для обеспечения еще большей безопасности жизни на просторах нашей страны.

Список литературы

1. ГОСТ 24846-2019. Грунты. Методы измерения деформаций зданий и сооружений. Москва: Стандартинформ; 2020.

2. СП 16.13330.2017. Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81* (с Изменениями № 1, № 2 и № 3, № 4 и № 5) [интернет]. Режим доступа: https://nostroy-sdo.ru/staticcontent/56.%20%D0%A1%D0%9F%2016.13330.2017%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8.%20%D0%90%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%9D%D0%B8%D0%9F%20II-23-81.pdf

3. *Фарфель М.И., Вдовенко А.И.* Мониторинг напряженно-деформированного состояния уникального трансформированного большепролетного покрытия стадиона «Газпром Арена» – основа его безопасной эксплуатации. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;35(4):133–148. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-133-148

4. *Микулин В., Одесский П.Д, Лебедева И.В., Оспенников А.Г., Отставнов В.А., Попов Н.А., Ханджи А.В., Фарфель М.И. и др.* Покрытие Большой спортивной арены стадиона «Лужники» (проектирование, научные исследования и строительство). Москва: Фортэ; 1998.

5. *Фарфель М.И., Гукова М.И., Коняшин Д.Ю., Кущенко А.Е., Любарцев А.В.* Особенности реконструкции Большой спортивной арены стадиона «Лужники» к Чемпионату мира по футболу в 2018 году. Вестник НИЦ «Строительство». 2017;14(3):74–92.

References

1. State Rtandard 24846-2019. Soils. Measuring methods of strains of structures and building bases. Moscow: Standartinform Publ.; 2020. (In Russian).

2. SP 16.13330.2017. Steel structures. Updated version of SNiP II-23-81* (with Amendments No. 1, No. 2 and No. 3, No. 4 and No. 5) [internet]. Available at: https://nostroy-sdo.ru/staticcontent/56.%20%D0%A1%D0%9F%2016.13330.2017%20%D0%A1%D1%82%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D1%8B%D0%B5%20%D0%BA%D0%BE%D0%BD%D1%81%D1%82%D1%80%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D0%B8.%20%D0%90%D0%BA%D1%82%D1%83%D0%B0%D0%BB%D0%B8%D0%B7%D0%B8%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D0%B0%D1%8F%20%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F%20%D0%A1%D0%9D%D0%B8%D0%9F%20II-23-81.pdf (in Russian).

3. *Farfel M.I., Vdovenko A.I.* Monitoring stress-strain state of the unique transformed long–span shell of the Gazprom Arena stadium as a basis for its safe operation. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;35(4):133–148. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-4(35)-133-148
4. *Mikulin V., Odessky P.D., Lebedeva I.V., Ospennikov A.G., Retiring V.A., Popov N.A., Khandzhi A.V., Farfel M.I. et al.* Covering of the Large Sports Arena of the Luzhniki Stadium (design, research and construction). Moscow: Forte Publ.; 1998. (In Russian).
5. *Farfel M.I., Gukova M.I., Konyashin D.Yu., Kuschenko A.E., Lyubarsky A.V.* Particularities of the reconstruction of the Grand Arena of the stadium "Luzhniki" to the football World Cup in 2018. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2017;14(3):74–92. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Михаил Владимирович Марков, директор ООО Фирма «ЮСТАС», Москва
e-mail: markov.mv@ooo-justas.ru
тел.: +7 (926) 135-12-64; +7 (499) 141-82-71
Mikhail V. Markov, Director of EUSTACE Company, Moscow
e-mail: markov.mv@ooo-justas.ru
tel.: +7 (926) 135-12-64; +7 (499) 141-82-71

Алексей Ремович Артемов, главный инженер ООО Фирма «ЮСТАС», Москва
e-mail: artemov@ooo-justas.ru
тел.: +7 (903) 516-98-96; +7 (499) 141-82-71
Alexey R. Artemov, Chief Engineer of EUSTACE Company, Moscow
e-mail: artemov@ooo-justas.ru
tel.: +7 (903) 516-98-96; +7 (499) 141-82-71

Александр Иванович Вдовенко✉**,** заместитель директора ООО Фирма «ЮСТАС», Москва
e-mail: vai@ooo-justas.ru
тел.: +7 (926) 253-06-95; +7 (499) 141-82-71
Alexander I. Vdovenko✉**,** Deputy Director of EUSTACE Company, Moscow
e-mail: vai@ooo-justas.ru
tel.: +7 (926) 253-06-95; +7 (499) 141-82-71

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 691.32:620.193.21
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142 EDN: VDKWWY

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА

Н.К. РОЗЕНТАЛЬ[1], д-р техн. наук
Г.В. ЧЕХНИЙ[2,✉], канд. техн. наук

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

[2] 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. Проблема морозостойкости бетона является одной из сложнейших в бетоноведении. Особое место здесь занимает вопрос о методах испытаний бетона на морозостойкость. Для повышения надежности результатов существующие стандартные методы требуют более детальной регламентации процесса испытаний.

Цель работы – анализ нормативных методов испытаний бетона на морозостойкость с целью подготовки предложений по совершенствованию стандартов.

Материалы и методы. Материалом для рассмотрения и анализа явились отечественные и зарубежные стандарты и публикации о методах испытаний бетона на морозостойкость.

Результаты. Выполнен анализ методов испытаний бетона на морозостойкость, включенных в отечественные и некоторые зарубежные стандарты. Показано, что для повышения качества определения морозостойкости бетона необходим контроль температуры при замораживании и оттаивании, гарантирующий оценку температуры в бетоне испытываемых образцов; контроль температуры воздушной среды в морозильной камере следует признать недостаточным. Следует продолжить проверку критериев состояния бетонных образцов в процессе и после циклического замораживания и оттаивания. Необходимо продолжить натурные испытания бетона в суровых климатических условиях с учетом реальных условий замораживания и оттаивания бетона в конструкциях, сопоставляя результаты лабораторных и натурных исследований, в том числе образцов-спутников.

Выводы. По результатам анализа сделаны выводы о необходимости продолжить исследования по уточнению методики испытаний и критериев оценки состояния бетонных образцов после циклов замораживания и оттаивания, целесообразно воссоздать приборы для определения динамического модуля упругости образцов в процессе испытания замораживанием и оттаиванием, возобновить длительные натурные испытания бетонов в суровых климатических условиях, разработать пособие по созданию морозостойких бетонов с учетом современного уровня технологии бетона. Устранение существующих недостатков методики позволит повысить надежность результатов испытаний.

Ключевые слова: морозостойкость бетона, методы определения морозостойкости, критерии оценки результатов испытаний, лабораторные исследования, натурные исследования

Для цитирования: Розенталь Н.К., Чехний Г.В. Анализ методов определения морозостойкости бетона. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):128–142. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142

Вклад авторов

Розенталь Н.К. – научное руководство, написание статьи.
Чехний Г.В. – участие в экспериментах, написание статьи.

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 01.05.2023
Поступила после рецензирования 28.05.2023
Принята к публикации 04.06.2023

ANALYSIS OF TEST METHODS FOR FROST RESISTANCE OF CONCRETE

N.K. ROZENTAL[1], Dr. Sci. (Engineering)
G.V. CHEKHNII[2,✉], Cand. Sci. (Engineering)

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

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

Abstract

Introduction. Frost resistance of concrete is one of the most challenging problems in concrete studies. Particularly important is the issue of methods of testing concrete for frost resistance. The existing standard methods require more detailed regulation of the test process in order to improve the reliability of the results.

Aim. To analyze the regulatory procedures of testing concrete for frost resistance with a view to make suggestions for improving standards.

Materials and methods. The analysis involved Russian and foreign standards and publications on methods of testing concrete for frost resistance.

Results. The authors analyzed the methods of testing concrete for frost resistance, included in Russian and some foreign standards. The quality of determining the frost resistance of concrete can be improved by controlling the temperature while freezing and thawing, in particular, by assessing the temperature in the concrete of the test samples. Controlling the air temperature in the freezer should be recognized as insufficient. The criteria for the state of concrete samples during and after cyclic freezing and thawing should be further verified. It is necessary to continue full-scale testing of concrete under severe climatic conditions, taking into account the real conditions of freezing and thawing of concrete in structures, and comparing the results of laboratory and full-scale tests, including satellite samples.

Conclusion. The analysis revealed the necessity to continue the research on clarifying the test methodology and criteria for assessing the state of concrete samples after freezing and thawing cycles. It is advisable to recreate devices for determining the dynamic modulus of elasticity of samples in freeze-thaw testing, to resume long-term full-scale tests of concrete under severe climatic conditions, and to develop a manual for creating frost-resistant concrete, taking into account the current level of concrete technology. Elimination of the existing drawbacks of the methodology will improve the reliability of test results.

Keywords: frost resistance of concrete, test methods for frost resistance, test criteria, laboratory tests, full-scale tests

For citation: Rozental N.K., Chekhnii G.V. Analysis of test methods for frost resistance of concrete. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):128–142. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-128-142

Author contribution statements
Rozental N.K. – scientific guidance, writing the manuscript.
Chekhnii G.V. – experimental study, writing the manuscript.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 01.05.2023
Revised 28.05.2023
Accepted 04.06.2023

Активная разработка проблемы морозостойкости бетона развивалась в России примерно с середины прошлого века. Наиболее интенсивно исследования выполнялись в 1960–1980-х годах. В исследованиях участвовали НИИЖБ, ЦНИИС, ВНИИГ им. Веденеева, ЛИИЖТ, НИИЖТ МПС, СоюздорНИИ, МИСИ им. В.В. Куйбышева, НИС Гидропроекта и многие другие организации. Опубликованы сотни работ, посвященные морозостойкости бетона, в том числе методам испытаний. К сожалению, в настоящее время объем научных исследований в этой области существенно сократился. Ушли из жизни многие ученые, внесшие большой вклад в исследование этой проблемы. В последние десятилетия сократилось число лабораторий, занимающихся исследованиями морозостойкости бетона, существенно снизилось финансирование экспериментальных работ в этом направлении. Большинство оставшихся лабораторий не имеет современного приборного оснащения.

Попытаемся кратко проанализировать процесс развития методов испытаний бетона на морозостойкость за последние полвека, отраженный в стандартах, чтобы выявить пути дальнейших исследований в данной области.

Изначально методы испытаний на морозостойкость основывались на процессе замораживания и оттаивания бетонных образцов. Варьировались длительность и температура замораживания, состав среды, в которой осуществлялось замораживание, контролируемые показатели состояния образцов, их количество и размеры. Практика бетонных работ требовала ускоренной оценки морозостойкости бетона, при этом всегда оставалось требование надежности получаемых результатов. Методы испытаний бетона на морозостойкость пересматривались и уточнялись при каждом переиздании стандарта. В настоящее время активное освоение северных территорий страны настоятельно требует совершенствования методов испытаний бетона на морозостойкость.

Краткий обзор показывает, как развивалась разработка стандартного метода испытаний бетона на морозостойкость по сравнению с первым изданием стандарта 1949 г. Испытания в пресной воде дополнены испытаниями в растворах солей, в естественных минерализованных водах, в том числе в морской воде. Ужесточились показатели состояния образцов после испытаний, понижалась критическая величина уменьшения прочности бетона и допустимое снижение массы образцов. Со временем выяснилось, что это отразилось на точности определения морозостойкости. В публикациях появились предложения доводить испытания до разрушения бетона, проводить испытания при –50 °С, учитывать наличие в водной среде солей.

Сводка показателей, при достижении которых прекращались испытания, приведена в табл. 1.

Таблица 1

Критерии оценки испытаний образцов на морозостойкость

Table 1

Criteria for frost resistance test

Источник	Критерии				
	Уменьшение прочности, %	**Уменьшение массы, %**	**Уменьшение динамического модуля упругости, %**	**Уменьшение скорости ультразвука, %**	**Деформации удлинения, %**
ГОСТ 4800–49	25	5	–	–	–
ОСТ 34–4618–73	15	–	–	–	–
ГОСТ 10060–76	15	5	–	–	–
ГОСТ 10060–87	5	3	–	–	–
ГОСТ 10060.0–95	5	3	–	–	–
ГОСТ 10060–2012	Нижняя граница доверительного интервала прочности основных образцов выше значения нижней границы доверительного интервала прочности контрольных образцов, умноженного на коэффициент 0,9				
	–	2	25	15	0,1
ГОСТ 26134–2016	Точка перелома на графике «логарифм числа ЦЗО – логарифм времени распространения ультразвука»				
В.М. Москвин [1]	–	–	–	–	При 0,85–1,1 полное разрушение
О.В. Кунцевич [2]	15	–	–	–	0,25
СТБ ЕН 1339–2007	–	1000 г/м^2	–	–	–
СТБ ЕН 1138–2007	–	1000 г/м^2	–	–	–
ГОСТ 17608–2017	5	500 г/м^2	–	–	–

Изменение прочности при сжатии

Стандарт ГОСТ 10060-87 подвергся критике. В работе [3] было указано, что использование критерия «снижение прочности бетона после заданного числа ЦЗО на 5 %» при существующем разбросе результатов определения прочности контрольных и основных образцов не дает надежной оценки морозостойкости. Отмечено, что по мере увеличения числа ЦЗО коэффициент вариации прочности увеличивается и превышает значения, характерные для контрольных образцов. Указано, что при повышенных коэффициентах вариации прочности бетона критерий «потеря прочности 15 %» более оправдан.

В статье [4] отмечено, что основным недостатком нормированных методов является недоведение испытаний образцов до критического состояния, т. е. образцы могли разрушиться после следующих нескольких ЦЗО или были способны еще длительно сопротивляться разрушению. В итоге конструкции изготавливаются из бетона с неопределенной морозостойкостью. Это не позволяет, анализируя состояние бетона в дорожных и аэродромных покрытиях, корректировать требования к бетону. При 5%-ном критерии прочности образцов после испытаний любой бетон может быть признан неморозостойким. Предельно допустимое снижение прочности после требуемого числа циклов замораживания и оттаивания рекомендовалось принять равным 10 %, что позволит определять соответствие бетона требуемой

марке по морозостойкости с доверительной вероятностью 0,90–0,95. Для сокращения объема испытаний при неизвестной однородности прочности бетона предложено дополнительно определять динамический модуль упругости или скорость ультразвука.

Лабораторные испытания показывают, что разрушение образцов в процессе замораживания-оттаивания происходит с поверхности. Это означает, что по сечению образца прочность бетона после ЦЗО различна, а при испытании образца на прессе определяется некоторая условная усредненная прочность. Из практики испытаний бетонных образцов на прочность известно, что даже небольшая непараллельность рабочих граней сильно искажает результаты испытаний. В равной степени это относится к испытаниям образцов после ЦЗО, когда рабочие грани повреждаются (шелушение или скалывание наружного слоя).

При испытании кернов, выбуренных из конструкций Красноярской ГЭС, авторы [5] отметили необходимость выполнять тщательную пришлифовку торцов. Подливка и другие подобные методы выравнивания рабочих поверхностей недопустимы.

В действующем ГОСТ 10060-2012 не прописана процедура выравнивания поверхности образцов, о чем следует ввести уточнение и дополнение в стандарт.

Опыт применения ГОСТ 10060-2012 показал, что в ряде случаев бетон выдерживает испытания по ГОСТ 10060-2012 при использовании приведенного в нем критерия $X_{min}^{II} \geq 0{,}9X_{min}^{I}$, но прочность бетона при этом снижается на 5–10 % и более.

В статье С. Л. Нерубенко и В. А. Гвоздева [4] рассмотрены свойства случайных величин при их нормальном распределении и сделан вывод, что количество параллельных образцов в каждый срок испытаний должно быть 3–6 штук в зависимости от внутрисерийного коэффициента вариации прочности. При 5%-ном критерии прочности образцов после испытаний любой бетон может быть признан неморозостойким. Предельно допустимое снижение прочности после требуемого числа циклов замораживания и оттаивания предложено принять равным 10 %. Это позволит определять соответствие бетона требуемой марке по морозостойкости с доверительной вероятностью 0,9–0,95.

Аналогичные результаты были получены и в наших исследованиях. Целесообразно вернуться к критерию «снижение прочности основных образцов на 10 или 15 % по сравнению с прочностью контрольных образцов». При этом следует прочность бетона в серии контрольных образцов определять с учетом внутрисерийного коэффициента вариации прочности. Серию образцов, внутрисерийный коэффициент вариации прочности которых превышает 9 %, не принимать к испытаниям. Требуются дальнейшие исследования.

При разработке бетона с повышенными требованиями при определении морозостойкости испытание образцов целесообразно выполнять до числа ЦЗО, превышающего критическое значение показателя, принятого в методе испытаний. Это позволит сравнивать морозостойкость бетонов различных составов и технологии изготовления. В дальнейшем в процессе производства разработанного бетона достаточно выполнять контрольные испытания по оценке морозостойкости с количеством ЦЗО, соответствующим проектной марке бетона по морозостойкости.

Остаточные деформации

Авторы [6, 7] указывают, что при медленном замораживании со скоростью изменения температуры 2 °С в час наиболее существенно изменяется прочность бетона, но не модуль упругости. Авторами сделан вывод, что только измерение остаточных продольных

деформаций позволяет выявить небольшие повреждения бетона. В работе О.В. Кунцевича в качестве максимально допустимых значений при испытании бетона на морозостойкость названы остаточные деформации 0,25 % и снижение прочности на 15 %.

В работе [8] при испытании на морозостойкость образцов, выпиленных из центрифугированного бетона, определяли остаточные деформации бетона. В качестве критерия были приняты относительные деформации – не более 0,1 %. Кроме того, применялось сквозное прозвучивание; погрешность измерения составляла 0,08 %. При испытании бетона на морозостойкость при температуре –50 °С с замером остаточных деформаций следует иметь в виду, что при расширении 0,85–1,1 % происходит полное разрушение бетона [1].

Фактор расстояния

В [9] рассмотрены работы четырех независимых лабораторий. Проверялась надежность критерия «фактор расстояния» по Пауэрсу. Варьировались вид и дозировка воздухововлекающих добавок, оценивалась роль длительности виброуплотнения, давления на бетонную смесь при уплотнении. Определялась роль общего объема вовлеченного воздуха, фактора расстояния, удельной поверхности воздушных пор при многократном замораживании в растворе соли и оттаивании. Величина фактора расстояния находилась в пределах 0,07–0,25 мм, удельная поверхность воздушных пор – 500–3800 $м^2/м^3$ бетона. Определяли количество бетона, отделившегося (scaling) от образцов. Установлено, что в исследовании морозостойкости бетона в растворе соли удельная поверхность воздушных пор более точно характеризует морозостойкость бетона. Высокая морозостойкость бетона наблюдалась в случаях, когда удельная поверхность пор превышала 1000 $м^2/м^3$. Полученный результат объясняют следующим. Разрушение бетона происходит при замерзании воды в капиллярах и не происходит при замерзании в воздушных порах, где остается некоторый объем воздуха. При увеличении удельной поверхности пор большее количество капилляров имеет выход в воздушные поры и меньшее количество капилляров такого выхода не имеет, что в конечном счете повышает морозостойкость бетона.

Однако следует иметь в виду, что критерий оценки по фактору расстояния сформулирован Пауэрсом для обычных бетонов. Современные бетоны имеют существенные структурные отличия. По мнению А.В. Шейнфельда [10], введение комплексных модификаторов вместе с воздухововлекающими добавками изменяет параметры условно-замкнутой пористости мелкозернистого бетона, повышая концентрацию мелких пор и уменьшая значение «фактора расстояния». При этом важную роль наряду с фактором расстояния играют суммарный объем пор и их численное содержание в единице объема. Определение фактора расстояния и удельной поверхности воздушных пор не позволяет определить марку бетона по морозостойкости.

Шелушение бетона

Для изделий и конструкций для дорожного и аэродромного строительства важным показателем является стойкость к разрушению рабочей поверхности при воздействии растворов противогололедных реагентов и мороза. Соответствующие методики испытаний разработаны в СоюздорНИИ, НИИ 26 Министерства обороны, V.J. Setzer в работе [11] изложил метод CDF. Указанный метод введен в стандарты СТБ ЕН 1339-2007, СТБ ЕН 1138-2007, ГОСТ 17608-2017. Отечественный и зарубежный методы различаются деталями. Общим

является то, что образцы замораживают и оттаивают при одностороннем контакте с соответствующим раствором.

Специалистами НИИЖБ разработана методика по определению шелушения поверхности бетона тротуарных плит. Морозостойкость бетона в плитах определяют на образцах размерами 100 × 100 мм и толщиной от 40 до 100 мм, изготовленных специально или выпиленных из изделий после достижения бетоном проектного возраста. Перед выполнением испытаний на боковые грани образцов наклеивают бортики, что позволяет в конце испытаний собрать отделившийся материал и после сушки взвесить. Образцы замораживают в 5%-ном растворе хлорида натрия при температуре минус (50 ± 5) °С и оттаивают в том же растворе при температуре плюс (20 ± 5) °С.

Режим испытаний:

– снижение температуры раствора до минус (50 ± 5) °С – (5 ± 0,5) ч;

– выдерживание температуры раствора при температуре минус (50 ± 5) °С – (3 ± 0,5) ч;

– оттаивание до температуры раствора (16 ± 5) °С – (16 ± 0,5) ч.

Критерии:

– снижение прочности при сжатии – не более 5 %;

– количество отделившегося материала – не более 500 г/м^2;

– отсутствуют трещины и сколы бетона.

Ученые НИИЖБ провели испытания тротуарных плит на морозостойкость с контролем шелушения рабочей поверхности бетона и подтвердили возможность его использования в качестве второго дополнительного метода оценки морозостойкости тротуарных плит согласно ГОСТ 17608. В настоящее время метод успешно применяется на предприятиях, выпускающих тротуарные плиты. Целесообразно его включение как дополнительного метода в стандарт ГОСТ 10060 для оценки шелушения поверхности бетона дорожных и аэродромных покрытий, а также бетонов, к которым предъявляют требования по декоративности.

Наш опыт применения стандарта показал, что в ряде случаев значения морозостойкости, найденные методами определения динамического модуля упругости и скорости ультразвука, не совпадают [12]. Одной из причин этого несоответствия является поврежденная поверхность бетонных образцов под воздействием циклов замораживания-оттаивания, что затрудняет качественный контакт ультразвуковых датчиков с бетоном.

Исследование морозостойкости, выполненное НИИЖБ совместно с АО «ЯкутПНИСС» [12, 13], показало отсутствие корреляции при испытании бетонных образцов на морозостойкость по второму и третьему ускоренным методам с определением морозостойкости по изменению скорости прохождения ультразвука. По результатам испытаний по всем режимам четко определено, что ультразвуковой метод завышает оценку морозостойкости бетона. Выполненные исследования по оценке морозостойкости бетона по изменению скорости ультразвука при сквозном продольном прозвучивании с помощью экспоненциальных преобразователей 54 кГц (предназначенных для работы на грубых поверхностях и без применения контактной жидкости) указывают на необходимость корректировки допускаемого нормативного значения данного показателя, например понизить с 15 до 5 %. Требуются дальнейшие исследования.

Исследование по уточнению критерия определения морозостойкости бетона по величине снижения динамического модуля упругости показало, что для указанных целей оптимальным решением является выполнение испытаний резонансным методом. Ранее в НИИЖБ были

выполнены обширные исследования морозостойкости неразрушающим резонансным методом с использованием прибора ИЧМК-3. Принцип работы на ИЧМК был достаточно прост.

Резонансный метод основан на возбуждении в образце вынужденных изгибных колебаний. При приближении частоты вынужденных колебаний к частоте собственных колебаний возникает явление резонанса. Момент достижения максимальной амплитуды колебаний соответствует частоте собственных колебаний образца.

Достоинство резонансного метода отмечено в работах многих исследователей. Отмечается, что измерение резонансных характеристик обнаруживает повреждение в бетонах при замораживании-оттаивании раньше, чем при определении скорости ультразвука.

В настоящее время аналогичные приборы в России не выпускаются, что исключает применение резонансного метода для оценки морозостойкости бетона.

Увеличение объемов производства конструкций из высокопрочных бетонов низкой проницаемости поставило задачу придания таким бетонам повышенную морозостойкость. При испытании на морозостойкость бетонов высокой прочности и низкой проницаемости такие бетоны не насыщаются водой/растворами за стандартный срок насыщения (4 суток по ГОСТ 10060), что приводит к увеличению сроков испытания образцов и, как следствие, завышению марки бетона по морозостойкости

В работе [14] были проверены способы увеличения водонасыщения высокопрочного бетона. Длительная выдержка образцов в условиях капиллярного всасывания воды, их вакуумирование, высушивание при температурах 60 и 100 °С, в том числе с последующим вакуумированием при давлении 0,1 МПа, не показали удовлетворительных результатов. Апробированные способы трудоемки и требуют дополнительного оборудования, увеличивают период испытания бетона на морозостойкость и, самое главное, в дальнейшем могут привести к занижению истинной морозостойкости бетона.

За 37 низкотемпературных циклов замораживания-оттаивания образцы не доведены до критических значений. Истинная морозостойкость высокопрочного бетона без добавки и с воздухововлекающей добавкой осталась неизвестна. Результаты позволили наметить программу исследований на будущее в части дополнения третьего ускоренного метода ГОСТ 10060 методами по оценке шелушения поверхности, определения прочности бетона в кернах, отобранных из конструкций.

Недавними исследованиями АО «ЯкутПНИИС» показано, что при особо низких отрицательных температурах (до минус 60–65 °С) разрушение бетона происходит быстрее, чем при температуре до минус 50 °С. Однако потребность в бетонах, стойких в указанных жестких морозных условиях, существует. Соответственно необходимы методы испытаний бетона, учитывающие подобные воздействия.

В нашей стране марка бетона по морозостойкости назначается на основании опыта эксплуатации конструкций для конкретных условий согласно СП 28.13330.2017. Единицей измерения морозостойкости является стандартный цикл замораживания-оттаивания, что требует проведения испытаний в строго нормируемых условиях. Различия методики проведения испытаний бетона на морозостойкость могут стать причиной недостоверной оценки качества бетона, что может в реальных условиях снизить безопасность зданий и сооружений. При реализации цикла замораживания и оттаивания необходимо в испытании гарантировать, что действительная температура в образцах будет соответствовать заданной стандартом.

В исследованиях [12, 14, 15] было показано, что время замораживания образцов зависит от их вида и размера, а также от степени загрузки и характеристик климатических камер. В испытаниях образцов размерами 100 × 100 × 100 мм время понижения температуры от 20 до минус 50 °С по датчикам, установленным в бетоне и хлоридном растворе в кювете, составило 4 ч. В то же время датчик климатической камеры, установленный в воздушной среде камеры, показал температуру минус 50 °С уже через 2 ч. При этом допускаемая скорость понижения температуры 5%-го раствора хлорида натрия должна быть не более 15 °С/ч.

Полученные результаты стали основой для разработки изменения № 1 к ГОСТ 10060-2012, в котором установлены новые правила контроля температуры режима третьего ускоренного метода по приборам контроля температуры 5%-го раствора хлорида натрия в емкости вблизи образца, расположенной в центре камеры. Перед началом испытания следует установить режим замораживания по контролю температуры раствора 5%-го хлорида натрия в емкости с образцом, который будет зависеть от размеров испытуемых образцов и объема загрузки камеры – не более 50 % ее полезного объема.

Анализ нормативной документации, приведенный в статье [16], показал, что основной принцип испытания материала на морозостойкость в зарубежных странах такой же, как в отечественных стандартах. Различия в методах отдельных стран имеются в основном в продолжительности замораживания-оттаивания и отчасти в оценке результатов испытания. При этом прослеживается различие методик в отдельных странах в зависимости от их климатических условий.

В зарубежных стандартах в качестве критериев используются динамический модуль упругости, критическое расширение замороженных образцов, количество отделившегося при замораживании материала. Рядом зарубежных авторов показано, что в сравнительных испытаниях образцов, изготовленных в лаборатории и вырезанных из конструкций, отсутствует корреляция результатов. Используют критерий «уменьшение динамического модуля упругости бетона» на 20 [17], 25 [18], 40 % [19].

Образцы, изготовленные в лаборатории и отобранные из конструкций, изготовленные из номинально одинакового бетона, могут в действительности существенно различаться. Это обусловлено различными влажностными и температурными условиями твердения, разным напряженным состоянием в процессе твердения в лабораторных образцах и в армированной железобетонной конструкции.

Другая проблема состоит в том, что условия замораживания и оттаивания бетона в лабораторных условиях и в реальных конструкциях существенно различаются. Если в лаборатории назначенный режим замораживания и оттаивания образцов может быть четко реализован, то в реальной конструкции он может изменяться по многим причинам. К числу этих причин относятся:

– воздействие на бетон в сооружениях переменных климатических температур, влажности, солнечной радиации;

– градиенты температуры по сечению бетона;

– напряженное состояние в бетоне конструкции, вызванное температурными градиентами [20, 21], внешней механической нагрузкой, вызывающей различного вида и величины напряжения в бетоне;

– наличие арматуры существенно изменяет напряженное состояние бетона при замораживании и оттаивании.

В опубликованных работах [20, 21] показано, что растягивающие напряжения, вызывая образование трещин, понижают морозостойкость бетона, а сжимающие напряжения сначала повышают, затем по мере увеличения понижают морозостойкость в сравнении с ненапряженным бетоном. Причиной такого поведения бетона является сложение (вычитание) напряжений, возникающих в бетоне при замораживании, с напряжениями, вызванными другими причинами (механической нагрузкой, образованием в бетоне новых продуктов с увеличением объема, например при реакции щелочей с реакционноспособным кремнеземом заполнителей, поздним образованием эттрингита и таумасита, разностью деформаций стальной арматуры и бетона при замораживании, деформациями усадки, другими причинами).

Исследования В.М. Москвина [1] показали, что напряжения при изгибе более 0,35 R_{tb} сильно ускоряют морозное разрушение бетона, а при 0,5–0,65 R_{tb} разрушение бетона происходит уже после нескольких ЦЗО. При осевом растяжении разрушение бетона при замораживании и оттаивании еще сильнее ускоряется. Авторы отмечают, что при расчете конструкций принимают, что коэффициенты термического расширения бетона и арматуры при положительной температуре практически равны: для бетона – $10 \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$, для стальной арматуры – $(9–12) \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$. В действительности в зависимости от вида цемента и заполнителя, а также В/Ц значения этого коэффициента для бетона изменяются в пределах $(8–16) \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$. Компоненты бетона тоже имеют различные коэффициенты термического расширения: цементный камень – $(8–18) \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$, заполнитель – $(5–14) \cdot 10^{-6}$ град$^{-1}$. На это различие накладывается также нелинейная зависимость от температуры расширения влажного и водонасыщенного бетонов в области отрицательных температур.

В работе [22] предложен подход к исследованию долговечности бетона, согласно которому долговечность должна исследоваться именно в конструкциях, подчеркнута необходимость выявлять механизмы деструкции.

Натурные испытания бетона на морозостойкость

Натурными испытаниями на морозостойкость бетона на морском стенде ЦНИИС, выполненными с участием Ф.М. Иванова, было показано, что в условиях периодического насыщения бетона морской водой, замораживания обдувом морозным воздухом с помощью вентилятора и оттаивания в морской воде бетон образцов в течение зимнего периода понижал динамический модуль упругости. В летний период величина динамического модуля упругости восстанавливалась. Объяснялось это самозалечиванием трещин в бетоне, образующихся в зимний период. По-видимому, это явление имеет большое значение для долговечности железобетонных конструкций и отчасти объясняет наблюдающуюся стойкость высококачественных бетонов в морских сооружениях. Нами наблюдалось полное зарастание трещин шириной раскрытия до 0,2 мм, специально организованных в попарно изогнутых армированных балках, находившихся несколько лет в приливно-отливной зоне на стенде в Кольском заливе. При этом коррозия стальной арматуры в этих трещинах была незначительной.

Представляет интерес опыт длительной эксплуатации железобетонных конструкций из бетона с проектной прочностью 40 МПа марки по морозостойкости F1000 в здании приливной электростанции (ПЭС), возведенной в губе Кислая Баренцева моря и сданной в эксплуатацию в 1968 г. После 15 лет эксплуатации бетон имел прочность при сжатии 70–86 МПа.

В последующем состояние бетона в конструкциях ПЭС неоднократно обследовалось [23, 24]. После 50 лет эксплуатации бетон в конструкциях не имел повреждений. Образцы-спутники, изготовленные в период строительства станции и находившиеся на морском стенде в зоне прилива-отлива, к этому времени приобрели шарообразную форму. Состояние их оценивалось баллом 1 по классификации С. В. Шестоперова [25]. Кроме того, в приливно-отливной зоне отдельно от здания станции испытывалась изготовленная из того же бетона железобетонная плита. На момент обследования конструкция не имела повреждений, прочность бетона превышала проектную. Обследование стен здания ПЭС после 50 лет эксплуатации не показало повреждений бетона.

Столь различное состояние бетона в образцах и в конструкциях можно объяснить:

– различием теплового режима в процессе замораживания и оттаивания образцов размерами 100 × 100 × 100 мм и массивных железобетонных конструкций в сооружении и в отдельно установленной плите;

– наличием напряжений сжатия в бетоне конструкции здания;

– наличием стальной арматуры в железобетонных конструкциях.

Сделан вывод: состояние стандартных бетонных образцов и железобетонных конструкций из того же бетона в приливно-отливной зоне Баренцева моря существенно различается. Вероятно, бетон образцов, выдержавших натурные испытания, будет заведомо стойким в морском сооружении.

На том же стенде были установлены образцы бетона, подобранного для возведения морских платформ восточнее острова Сахалин (бетоны подобранного состава при строительстве платформ не были использованы). Бетон изготовлен с применением современных эффективных пластификаторов и микрогазообразующих добавок. За время наблюдения образцы, находившиеся на стенде Кислогубской ПЭС более 15 лет, претерпели более 6000 циклов замораживания и оттаивания и не имели повреждений: шелушения поверхности, трещин и скругления углов.

Высокую морозостойкость показали бетонные массивы, изготовленные с микрогазообразующей добавкой ГКЖ-94 [26]. Массивы были установлены в приливно-отливной зоне Кольского залива и через 10 лет не имели повреждений. Далее наблюдение не проводилось. Аналогичные массивы из бетонов без добавки имели сколы ребер и углов через 4 года испытаний.

Следует учитывать, что лабораторный метод замораживания и оттаивания образцов не может полностью воспроизвести процессы, происходящие в бетоне при воздействии реальных нестабильных условий эксплуатации бетона в конструкциях. Лабораторные испытания бетона на морозостойкость следует дополнять натурными испытаниями лабораторных образцов и конструкций в конкретных условиях эксплуатации. Для этого следует восстановить и создать новые стенды для натурных испытаний в районах с суровыми климатическими условиями.

Существенно важной представляется большая работа, выполненная в Новосибирском институте железнодорожного транспорта И. З. Актугановым [27]. В работе освещены результаты исследований, выполненных НИИЖТ МПС в 1969–1999 гг. Предложена методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на эксплуатационную надежность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций. Работа прервана в 1991 г. в связи с прекращением финансирования.

Заключение

Выполненный анализ стандартных лабораторных методов испытаний бетона на морозостойкость показал, что испытание бетона на морозостойкость для железобетонных сооружений, предназначенных для эксплуатации в суровых климатических условиях, следует выполнять только с многоцикловым замораживанием и оттаиванием водонасыщенного бетона. Следует продолжить исследования с целью уточнения численных значений и выбора критериев оценки результатов испытаний из следующего перечня:

– снижение прочности бетона;
– потеря массы образцов;
– величина остаточных деформаций;
– изменение динамического модуля упругости;
– уменьшение скорости ультразвука.

Целями таких исследований должно быть сопоставление результатов и выбор критериев оценки состояния бетонных образцов. Сравнение, обоснование и выбор критериев позволит повысить надежность получаемых результатов, уменьшить длительность и трудоемкость испытаний.

Следует поставить вопрос о воссоздании приборов для определения динамического модуля упругости бетонных образцов резонансным методом.

Важно возобновить длительные натурные испытания образцов и конструкций, наблюдения за состоянием железобетонных сооружений в суровых климатических условиях с анализом информации об использованных материалах и технологиях, с оценкой климатических условий и агрессивности среды.

Назрела необходимость в разработке пособия по производству и оценке качества морозостойких бетонов, в котором должны быть отражены вопросы технологии, начиная от вида и выбора исходных материалов (цемента, заполнителей, добавок), состава бетона (В/Ц, расход цемента, соотношение количества мелкого и крупного заполнителя, содержание вовлеченного воздуха, воды), технологии приготовления, уплотнения, режима твердения/выдерживания, заканчивая методами оценки коррозионной стойкости и морозостойкости бетона в конструкции.

Список литературы

1. *Москвин В.М., Капкин М.М., Савицкий А.Н., Ярмаковский В.Н.* Бетоны для строительства в суровых климатических условиях. Ленинград: Стройиздат; 1973.
2. *Кунцевич О.В.* Бетоны высокой морозостойкости для сооружений Крайнего Севера. Ленинград: Стройиздат; 1983.
3. *Подвальный А.М.* Об испытании бетона на морозостойкость. Бетон и железобетон. 1996;(4):26–29.
4. *Нерубенко С.Л., Гвоздев В.А.* О совершенствовании методов и испытаний бетона на морозостойкость. Бетон и железобетон. 1998;(5):21–23.
5. *Кунцевич О.В., Жуков Ю.А.* Применение добавки ГКЖ-94 на строительстве Красноярской ГЭС. В: Применение железобетонных конструкций транспортных сооружений в суровых климатических условиях. Москва; 1974, с. 101–105.
6. *Pigeon M., Lemaire F.* Etude des propriétés fondamentales de bétons courants soumis à de longs cycles de gel-dégel. Canadian Journel of Civil Engineering. 1980;7(3):407–420. https://doi.org/10.1139/l80-050

7. *Pigeon M., Regourd M.* The effects of freeze-thaw-cycles on the microstructure of hydration products. Durability of Building Materials. 1986;4(1):1–19.
8. *Зикеев Л.Н., Леонович С.Н.* Неразрушающие методы контроля морозостойкости центрифугированного бетона. В: Коррозия бетона и арматуры в агрессивных средах. Москва: НИИЖБ; 1990, с. 69–77.
9. *Hashold M.T.* Air void structure and frost resistance: a challenge to Powers´spacing factor. Materials and Structures. 2014;47(5):911–923. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0102-9
10. *Шейнфельд А.В.* Научные основы модифицирования бетонов комплексными органоминеральными добавками на основе техногенных пуццоланов и поверхностно-активных веществ [диссертация]. Москва; 2015.
11. *Setzer V.J., Fagerlund G., Janssen D.J.* CDF-Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution (CDF). Materials and Structures. 1996;29(9):523–528. https://doi.org/10.1007/bf02485951
12. *Степанова В.Ф., Чехний Г.В., Паршина И.М., Орехов С.А.* Исследование морозостойкости бетона с целью корректировки стандарта ГОСТ 10060-2012. Вестник НИЦ «Строительство». 2021;30(3):78–87. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-78-87
13. Исследования по выявлению оптимальной продолжительности циклов замораживания-оттаивания бетонных образцов, как наиболее достоверно отражающие реальные условия эксплуатации бетон конструкций гражданских, промышленных, транспортных и гидротехнических сооружений. Отчет по научно-исследовательской работе. Москва; 2020.
14. *Степанова В.Ф., Чехний Г.В., Паршина И.М., Орехов С.А., Круглов А.И.* Исследование морозостойкости/морозосолестойкости высокопрочного бетона класса В60-В100. Вестник НИЦ «Строительство». 2022;33(2):183–193. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-183-193
15. *Степанова В.Ф., Розенталь Н.К., Чехний Г.В., Паршина И.М., Орехов С.А., Джейранов С.Э.* Исследование морозостойкости бетона с целью уточнения методов определения его морозостойкости/морозосолестойкости. Вестник НИЦ «Строительство». 2020;24(1):108–117.
16. *Фаликман В.Р., Степанова В.Ф., Чехний Г.В.* О нормировании морозостойкости бетона в зарубежной и отечественной практике. Бетон и железобетон. 2021; 603(1):8–15.
17. *Palecki S.* Data of CIF test with high performance concrete. Duisburg – Essen: IBPM University.
18. ZTV-W LD 215 (Zusätzliche Technische Vertragbedingungen des Wasserbaus – Leistungsbereic h 215), Neubau von Wasserbauwerken, 2005.
19. Japanese Standards Association (JSA). JIS A 6204. Chemical admixtures for concrete. JSA; 2011.
20. *Лукьянов В.С., Денисов И.И.* Защита бетонных опор мостов от температурных трещин. Москва: Трансжелдориздат; 1959.
21. *Еремеев Г.Г.* Термоупругие напряжения в бетонах при испытаниях на морозостойкость. Бетон и железобетон. 1960;(9):393–395.
22. *Чернышов Е.М.* Морозная деструкция бетонов. Часть 1. Механизм, критериальные условия управления. Строительные материалы. 2017;(9):40–46.
23. *Усачев И.Н., Розенталь Н.К.* Строительные материалы для морских энергетических сооружений Крайнего Севера. Гидротехническое строительство. 2009;(7):13–21.
24. *Розенталь Н.К., Усачев И.Н., Галашов А.В.* Долговечность железобетонных конструкций Кислогубской ПЭС в Арктике. Технологии бетона. 2014;(1):22–26.
25. *Шестоперов С.В.* Долговечность бетона транспортных сооружений. Москва: Транспорт; 1966.
26. *Батраков В.Г.* Повышение долговечности бетона добавками кремнийорганических полимеров. Москва: Стройиздат; 1967.
27. *Актуганов И.З.* Методика оценки влияния климатических температурно-влажностных воздействий на эксплуатационную надежность и долговечность бетона строительных конструкций. Новосибирск: Изд-во СТУПСа; 2005.

References

1. *Moskvin V.M., Kapkin M.M., Savitsky A.N., Yarmakovsky V.N.* Concretes for construction in harsh climatic conditions. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1973. (In Russian).
2. *Kuntsevich O.V.* Concretes of high frost resistance for structures of the Far North. Leningrad: Stroyizdat Publ.; 1983. (In Russian).
3. *Basalny A.M.* On testing concrete for frost resistance. Beton i zhelezobeton. 1996;(4):26–29. (In Russian).
4. *Nerubenko S.L., Gvozdev V.A.* On the improvement of methods and tests of concrete for frost resistance. Beton i zhelezobeton. 1998;(5):21–23. (In Russian).
5. *Kuntsevich O.V., Zhukov Yu.A.* Application of the additive GKZH-94 on the construction of the Krasnoyarsk HPP. In: Application of reinforced concrete structures of transport structures in harsh climatic conditions. Moscow; 1974, pp. 101–105. (In Russian).
6. *Pigeon M., Lemaire F.* Etude des propriétés fondamentales de bétons courants soumis à de longs cycles de gel-dégel. Canadian Journel of Civil Engineering. 1980;7(3):407–420. https://doi.org/10.1139/l80-050
7. *Pigeon M., Regourd M.* The effects of freeze-thaw-cycles on the microstructure of hydration products. Durability of Building Materials. 1986;4(1):1–19.
8. *Zikeev L.N., Leonovich S.N.* Non–destructive methods of frost resistance control of centrifuged concrete. In: Corrosion of concrete and reinforcement in aggressive environments. Moscow: NIIZHB Gosstroy of the USSR; 1990, pp. 69–77. (In Russian).
9. *Hashold M.T.* Air void structure and frost resistance: a challenge to Powers´spacing factor. Materials and Structures. 2014;47(5):911–923. https://doi.org/10.1617/s11527-013-0102-9
10. *Sheinfeld A.V.* Scientific bases of concrete modification with complex organomineral additives based on technogenic pozzolans and surfactants [dissertation]. Moscow; 2015. (In Russian).
11. *Setzer V.J., Fagerlund G., Janssen D.J.* CDF-Test method for the freeze-thaw resistance of concrete-tests with sodium chloride solution (CDF). Materials and Structures. 1996;29(9):523–528. https://doi.org/10.1007/bf02485951
12. *Stepanova V.F., Chehniy G.V., Parshina I.M., Orehov S.A.* Study of frost resistance of concrete in order to adjust the standard GOST 10060-2012. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2021;30(3):78–87. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2021-3(30)-78-87
13. Studies on the identification of the optimal duration of freezing-thawing cycles of concrete samples as the most reliably reflecting the real operating conditions of concrete structures of civil, industrial, transport and hydraulic structures. Report on research work. Moscow; 2020. (In Russian).
14. *Stepanova V.F., Chehniy G.V., Parshina I.M., Orekhov S.A., Kruglov A.I.* Study into the freeze-thaw/ frost-salt resistance of high-strength B60–B100 concrete. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2022;33(2):183–193. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2022-2(33)-183-193
15. *Stepanova V.F., Rosental N.K., Chehniy G.V., Parshina I.M., Orehov S.A., Jeyranov S.E.* Study of frost resistance of concrete in order to clarify the methods for determining its frost / frost resistance. Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction. 2020;24(1):108–117. (In Russian).
16. *Falikman V.R., Stepanova V.F., Chehniy G.V.* On codification of concrete frost resistance in foreign and domestic practice. Beton i zhelezobeton = Concrete and Reinforced Concrete. 2021;603(1):8–15. (In Russian).
17. *Palecki S.* Data of CIF test with high performance concrete. Duisburg – Essen: IBPM University.
18. ZTV-W LD 215 (Zusätzliche Technische Vertragbedingungen des Wasserbaus – Leistungsbereic h 215), Neubau von Wasserbauwerken, 2005.
19. Japanese Standards Association (JSA). JIS A 6204. Chemical admixtures for concrete. JSA; 2011.
20. *Lukyanov V.S., Denisov I.I.* Protection of concrete bridge supports from temperature cracks. Moscow: Transzheldorizdat Publ.; 1959. (In Russian).
21. *Yeremeev G.G.* Thermoelastic stresses in concrete during frost resistance tests. Beton i zhelezobeton. 1960;(9):393–395. (In Russian).
22. *Chernyshov E.M.* Frost destruction of concrete. Part 1. Mechanism, criteria conditions of management. Stroitel'nye materialy = Construction Materials. 2017;(9):40–46. (In Russian).
23. *Usachev I.N., Rosenthal N.K.* Building materials for marine power structures of the Far North. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2009;(7):13–21. (In Russian).
24. *Rosenthal N.K., Usachev I.N., Galashov A.V.* Durability of reinforced concrete structures of the Kislogubskaya PES in the Arctic. Tekhnologii betona. 2014;(1):22–26. (In Russian).

25. *Shestoperov S.V.* Durability of concrete transport structures. Moscow: Transport Publ.; 1966. (In Russian).
26. *Batrakov V.G.* Increasing the durability of concrete with additives of organosilicon polymers. Moscow: Stroyizdat Publ.; 1967. (In Russian).
27. *Aktuganov I.Z.* Methodology for assessing the influence of climatic temperature and humidity influences on the operational reliability and durability of concrete building structures. Novosibirsk: STOOPs Publishing house; 2005. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Николай Константинович Розенталь, д-р техн. наук, профессор кафедры «Строительные сооружения, конструкции и материалы» АО «НИЦ «Строительство», Москва
Nikolai K. Rozental, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Department of Buildings, Structures, and Materials, JSC Research Center of Construction, Moscow

Галина Васильевна Чехний✉**,** канд. техн. наук, заведующий сектором коррозии бетона лаборатории коррозии и долговечности бетонных и железобетонных конструкций НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство», Москва
e-mail: chehniy@mail.ru
тел.: +7 (499) 174-76-97
Galina V. Chekhii✉**,** Cand. Sci. (Engineering), Head of Concrete Corrosion Section, Laboratory of Corrosion and Durability of Concrete and Reinforced Concrete Structures, NIIZHB named after A.A. Gvozdev, JSC Research Center of Construction, Moscow
e-mail: chehniy@mail.ru
tel.: +7 (499) 174-76-97

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 699.841
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-143-154 EDN: YGFQNY

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕЙСМОИЗОЛИРОВАННЫХ ЗДАНИЙ С ФРИКЦИОННО-МАЯТНИКОВЫМИ ОПОРАМИ

Д.Н. НИЗОМОВ, д-р техн. наук
А.М. САНГИНОВ✉, канд. техн. наук
Институт геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии Национальной академии наук Таджикистана, улица Айни, д. 267, Душанбе, 734063, Республика Таджикистан

Аннотация

Введение. В настоящее время на территории Таджикистана проектируются и возводятся здания и сооружения на основе пассивных способов обеспечения сейсмостойкости, что в итоге приводит к увеличению жесткости и веса сооружений и, соответственно, увеличению сейсмической нагрузки. В статье рассматривается решение задачи, связанной с сейсмоизоляцией зданий с применением фрикционно-маятниковых опор. Динамическая модель исследуемого объекта представлена в виде системы, состоящей из суперструктуры, субструктуры и сейсмоизоляции.

Целью работы является дальнейшее развитие методов анализа и оценки параметров систем сейсмоизоляции и сейсмозащиты зданий и сооружений для обоснования условий эффективности их применения в сейсмостойком строительстве на территории Республики Таджикистан.

Материалы и методы. Использованы методы строительной механики, динамики сооружений, а также методы численного моделирования. Методика исследований включала построение математических моделей рассматриваемых систем, их численный анализ, сопоставление полученных результатов с имеющимися данными. Проводились экспериментальные исследования на модели фрагмента здания с использованием виброплатформы.

Результаты. Разработана математическая модель, позволяющая проводить исследования напряженно-деформированного состояния здания с маятниковыми скользящими опорами при различных внешних воздействиях, в том числе сейсмических. Система дифференциальных уравнений с использованием метода последовательных аппроксимаций преобразуется в систему алгебраических уравнений, которая решается на каждом шаге по времени. На основе разработанного алгоритма составлена компьютерная программа на языке Fortran и получены результаты численного решения динамической задачи по расчету многоэтажного здания с маятниковыми скользящими опорами. На примере 10-этажного каркасного здания получены результаты от действия мгновенного импульса.

Выводы. Сравнение результатов показывает, что применение сейсмоизоляции в виде фрикционно-маятниковых опор приводит к значительному уменьшению внутренних усилий в опорной части, а также к уменьшению скорости и ускорения в верхней части здания по сравнению с моделью без сейсмоизолирующих опор. При этом несколько увеличиваются перемещения как в нижней, так и верхней частях исследуемого объекта.

Ключевые слова: сейсмоизоляция, сферическая поверхность, маятник, скольжение, сила трения, суперструктура, численное моделирование

Для цитирования: Низомов Д.Н., Сангинов А.М. Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с фрикционно-маятниковыми опорами. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):143–154. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-143-154

Вклад авторов
Низомов Д.Н. – постановка задачи исследования, разработка математической модели, разработка компьютерной программы, проведение численных экспериментов и подтверждение достоверности результатов, написание текста статьи.
Сангинов А.М. – анализ результатов исследований, проведенных в области сейсмоизоляции зданий и сооружений, анализ результатов исследования и подготовка данных, выполнение работы по систематизации материала, написание текста статьи.

Финансирование
Работа выполнена на основе бюджетного финансирования № РН 0116TJ00579.

Конфликт интересов
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 04.05.2023
Поступила после рецензирования 22.05.2023
Принята к публикации 30.05.2023

NUMERICAL SIMULATION OF SEISMICALLY ISOLATED BUILDINGS WITH FRICTION PENDULUM BEARINGS

D.N. NIZOMOV, Dr. Sci. (Engineering)
A.M. SANGINOV✉, Cand. Sci. (Engineering)

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

Abstract

Introduction. At present, in Tajikistan, buildings and structures are designed and constructed on the basis of passive methods of ensuring seismic resistance, which ultimately leads to an increase in stiffness and weight of structures and, accordingly, in seismic load. The present paper analyses seismic isolation of buildings provided by friction pendulum bearings. The dynamic model of the object under study is represented as a system consisting of a superstructure, substructure and seismic isolation.

Aim. To contribute to the development of methods for analysis and evaluation of seismic isolation and earthquake protection of buildings and structures in order to justify the conditions for their effective application in earthquake-resistant construction on the territory of the Republic of Tajikistan.

Materials and methods. The authors used methods of structural mechanics, structural dynamics, and numerical simulation. The research methodology involves mathematical modeling of the systems under consideration, numerical analysis, comparison of the obtained results with the available data. Experimental investigation was carried out on a building fragment model and a vibration platform.

Results. The authors developed a mathematical model for investigating the stress-strain state of a building with friction pendulum bearings subjected to various external influences, including seismic ones. The differential equation system using successive approximations is transformed into a system of algebraic equations, which is solved at each time step. On the basis of the created algorithm, the authors developed a computer program in Fortran and obtained the numerical results of the dynamic calculation for a multi-story building with friction pendulum bearings. The results from the action of an instantaneous impulse are obtained on the example of a 10-story frame building.

Conclusions. The results show that the application of seismic isolation in the form of friction pendulum bearings leads to a significant reduction of internal forces in the support part, as well as to a reduction of velocity and

acceleration in the upper part of the building compared to the model without seismic isolation bearings. At the same time, the deflections of both the lower and upper parts of the investigated object slightly increase.

Keywords: seismic isolation, spherical surface, pendulum, sliding, friction force, superstructure, numerical simulation

For citation: Nizomov D.N., Sanginov A.M. Numerical simulation of seismically isolated buildings with friction pendulum bearings. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):143–154. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-143-154

Author contribution statements
Nizomov D.N. – problem statement, development of the mathematical model and computer program, conducting numerical experiments, validation of the results, writing the manuscript.
Sanginov A.M. – analysis of the investigation results relating to seismic isolation of buildings and structures, data analysis and interpretation, data systematization, writing the manuscript.

Funding
The study was supported by government funding No. PH 0116TJ00579.

Conflict of interest
The authors declare no conflict of interest.

Received 04.05.2023
Revised 22.05.2023
Accepted 30.05.2023

Фрикционно-маятниковые опоры (ФМО) (или маятниковые скользящие опоры) в зависимости от конструктивных решений подразделяются на опоры: с одной сферической поверхностью скольжения – одномаятниковые скользящие опоры; с двумя сферическими поверхностями скольжения – двухмаятниковые скользящие опоры; с четырьмя сферическими поверхностями скольжения – трехмаятниковые скользящие опоры. Фрикционные опоры называются маятниковыми скользящими, так как расположенная на них конструкция совершает колебания, подобные движениям математического маятника при наличии трения. Маятниковые опоры изготавливают из нержавеющей стали, а их сферические поверхности имеют покрытия из материалов, обладающих заданными фрикционными свойствами [1–3]. Вопросы численного решения динамических задач и сейсмозащиты рассмотрены в работах [4–11].

Рассмотрим многоэтажное здание с сейсмоизоляцией при сейсмическом воздействии. В качестве сейсмозоляции используются маятниковые скользящие опоры. Динамическая модель исследуемого объекта, которая состоит из n сосредоточенных масс, представлена на рис. 1*а*. Одномаятниковая скользящая опора состоит из двух горизонтальных плит, одна из которых имеет сферическую вогнутую поверхность и расположена между плитами сферического шарнирного ползуна (рис. 2*а*). Особенности поведения и сейсмоизолирующие свойства одномаятниковой скользящей опоры зависят от радиуса кривизны сферической поверхности R и значения коэффициента трения скольжения μ ползуна по сферической поверхности (рис. 2*б*). Как следует из статического равновесия сил, действующих и возникающих в процессе скольжения по сферической поверхности,

$$F = F_T \cos\alpha + F_N \sin\alpha, \quad (1)$$

$$Q = F_N\cos\alpha - F_T\sin\alpha, \tag{2}$$

$$\sin\alpha = u_1/R,\ \cos\alpha = (R - \delta)/R = 1 - \delta/R,$$

где F, Q – горизонтальная и вертикальная силы, действующие на фрикционную опору;

F_T, F_N – тангенциальная и нормальная силы, действующие на ползунок скольжения;

R – радиус сферической поверхности.

Тангенциальная сила как сила трения выражается через нормальную силу

$$F_T = \mu F_N, \tag{3}$$

где μ – коэффициент трения.

Из (1) и (2) с учетом (3) получаем

$$F = F_N(\mu\cos\alpha + \sin\alpha),\ Q = F_N(\cos\alpha - \mu\sin\alpha),$$

$$\frac{F}{Q} = \frac{\sin\alpha + \mu\cos\alpha}{\cos\alpha - \mu\sin\alpha},\quad F = Q\frac{\sin\alpha + \mu\cos\alpha}{\cos\alpha - \mu\sin\alpha}. \tag{4}$$

Из-за малости угла α можно предположить, что $\cos\alpha - \mu\sin\alpha \approx 1$, тогда уравнение (4) можно представить в виде

$$F = Q(\sin\alpha + \mu\cos\alpha) = Q(u_1/R + \mu\cos\alpha) = k_h u_1 + Q\mu\cos\alpha, \tag{5}$$

$$F/Q = u_1/R + \mu\cos\alpha,$$

где $k_h = k_1 = Q/R$ – коэффициент горизонтальной жесткости ФМО;

Q, M – вес и масса суперструктуры: $Q = M \times g$, $M = m_1 + m_2 + ... + m_n$;

g – ускорение свободного падения.

Из (5) следует, что при $R \to \infty$ и $\alpha \to 0$ горизонтальная сила $F = \mu Q$, что соответствует силе трения в обычной скользящей опоре.

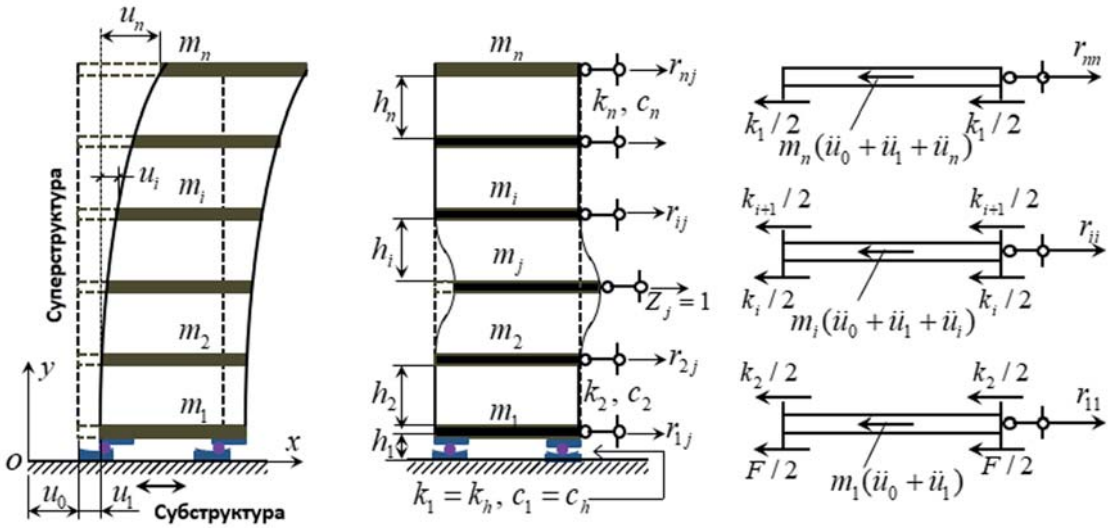
Далее рассмотрим расчетную модель многоэтажного здания со скользящими одномаятниковыми опорами (рис. 1). В случае сейсмического воздействия, в момент времени t здание перемещается на величину u_0, а за счет скольжения опоры перемещается еще на величину $u_b = u_1$, и только после этого оно деформируется (рис. 1*а*). Уравнение движения такой системы можно получить исходя из основной системы метода перемещений (рис. 1*б*). Систему уравнений движения можно получить исходя из равновесия каждой массы.

Уравнение динамического равновесия опорной массы здания $m_b = m_1$ (рис. 1*в*), с учетом затухания, представляется в виде

$$m_1(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1) + c_h\dot{u}_1 + F + r_{12}u_2 = 0, \tag{6}$$

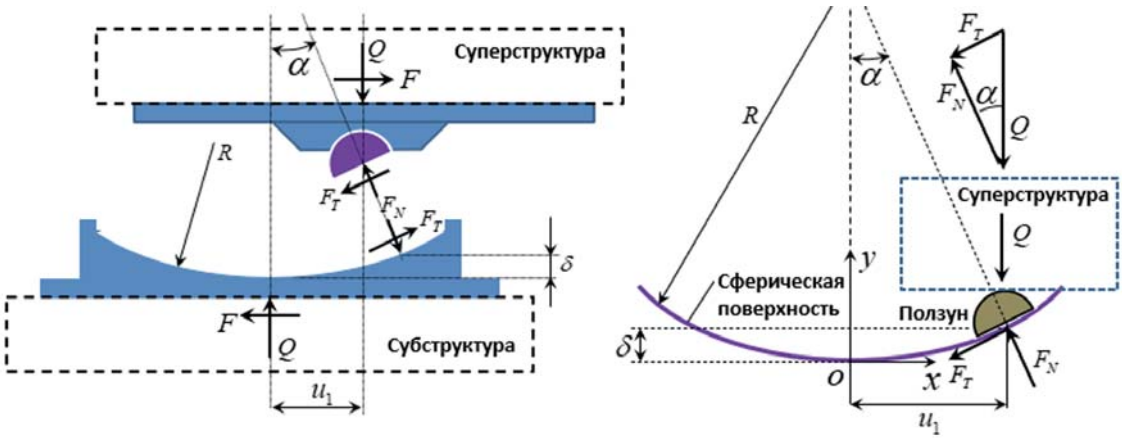
где $r_{12} = -k_2$, $k_2 = 2 \times 12EI/h_2^3$ – реакция в элементах первого этажа от единичного перемещения $Z_1 = 1$;

$c_h = c_1$ – параметр затухания ФМО.



а б в

Рис. 1. Динамическая модель здания и основная система метода перемещений
Fig. 1. Dynamic building model and basic system of deflection method



а б

Рис. 2. Кинематика одномаятниковой скользящей опоры
Fig. 2. Kinematics of friction pendulum bearing

Сила F, которая состоит из суммы двух сил, представляется так:

$$F = k_h \times u_1 + \mu Q \cos\alpha \times \operatorname{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1),$$
$$k_h = k_1 = Q/R, \tag{7}$$

$\operatorname{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1)$ – кусочно-постоянная нечетная функция действительного аргумента с областью определения $(-\infty; +\infty)$ и областью значений $(-1; 0; +1)$;

$\dot{u}_0$ – скорость движения основания здания;

$\dot{u}_1$ – скорость движения массы m_1.

Подставив (7) в (6), получаем уравнение движения массы m_1

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + \mu Q \cos\alpha \times \operatorname{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_b) + k_1 u_1 - k_2 u_2 = - m_1 \ddot{u}_0(t), \tag{8}$$

Функцию $\cos\alpha(t)$ в (8) можно представить как производную от $\sin\alpha(t) = u_1(t)/R$:

$$\frac{d}{dt}\sin\alpha = \cos\alpha \frac{d\alpha}{dt} = \frac{1}{R}\frac{du_1}{dt}, \qquad \cos\alpha = \frac{1}{R}\frac{\dot{u}_1}{\dot{\alpha}}. \tag{9}$$

Если учесть, что круговая частота свободных колебаний математического маятника (рис. 2*б*) без учета и с учетом затухания соответственно равна:

$$\omega_0 = \sqrt{k_1 / M} = \sqrt{Q / MR} = \sqrt{g / R}, \qquad \omega_D = \dot{\alpha} = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2}, \tag{10}$$

то уравнение (8), с учетом (9) и (10), можно представить в следующем виде

$$m_1 \ddot{u}_1 + c_1 \dot{u}_1 + c_0 \dot{u}_1 \times u \operatorname{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1) + k_1 u_1 - k_2 u_2 = - m_1 \ddot{u}_0(t), \tag{11}$$

$$c_0 = \frac{\mu Q}{R\dot{\alpha}} = \left| Q = \omega_0^2 MR,\ \dot{\alpha} = \omega_D \right| = \mu M \frac{\omega_0^2}{\omega_D}.$$

Делим обе части (11) на m_1 с учетом (10), где

$$\frac{k_1}{m_1} = \frac{Q}{m_1 R} = \frac{Mg}{m_1 R} = \frac{Mg}{m_1 R} = \frac{M}{m_1}\omega_0^2,$$

получаем

$$\ddot{u}_1 + 2\xi_1 \omega_0 \dot{u}_1 + \mu \frac{M}{m_1}\frac{\omega_0^2}{\omega_D}\dot{u}_1 \times \operatorname{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1) + \frac{M}{m_1}\omega_0^2 u_1 - \frac{k_2}{m_1}u_2 = -\ddot{u}_0(t). \tag{11*a*}$$

Коэффициент затухания ξ_1 в (11*a*) зависит от фрикционных свойств материалов сферических поверхностей и ползунов, его можно принять в пределах от 10 до 30 % от критического затухания

$$\xi_1 = c_h / c_{cr}; \qquad c_{cr} = 2 m_1 \omega_0; \quad 0{,}1 \le \xi_1 \le 0{,}3.$$

Уравнения движения массы m_j и m_n записываются в виде

$$m_j(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_j) + c_j \dot{u}_j + r_{jj-1} u_{j-1} + r_{jj} u_j + r_{jj+1} u_{j+1} = 0,$$

$$j = 2, 3, \ldots, n-1,$$

$$m_n(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1 + \ddot{u}_j) + c_n \dot{u}_j + r_{nn-1} u_{n-1} + r_{nn} u_n = 0,$$

здесь $r_{jj-1} = -k_j$, $r_{jj} = k_j + k_{j+1}$, $r_{jj+1} = -k_{j+1}$, $r_{nn-1} = -k_n$, $r_{nn} = k_n$,

$$m_j \ddot{u}_j + c_j \dot{u}_j - k_j u_{j-1} + (k_j + k_{j+1}) u_j - k_{j+1} u_{j+1} = - m_j(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1), \tag{12}$$

$$\ddot{u}_j + 2\omega_j\xi_j\dot{u}_j - \omega_j^2 u_{j-1} + (\omega_j^2 + \omega_{j+1}^2)u_j - \omega_{j+1}^2 u_{j+1} = -(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1),$$
$$\omega_j^2 = k_j/m_j,\ c_j = \xi c_{cr} = \xi 2\omega_j m_j,\ j = 2, 3, ..., n-1.$$

Уравнение движения массы m_n представляется в виде

$$m_n\ddot{u}_n + c_n\dot{u}_n - k_n u_{n-1} + k_n u_n = -m_n(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1), \quad (13)$$
$$\ddot{u}_n + 2\omega_n\xi_n\dot{u}_n - \omega_n^2 u_{n-1} + \omega_n^2 u_n = -(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1),$$
$$\omega_n^2 = k_n/m_n.$$

Если предположить, что жесткости вертикальных элементов динамической модели здания стремятся к бесконечности, где относительные перемещения $u_2 = u_3 = ... = u_n = 0$, то задача сводится к рассмотрению уравнения

$$M\ddot{u}_1 + c_1\dot{u}_1 + \mu M\frac{\omega_0^2}{\omega_D}\dot{u}_1 \times \mathrm{sgn}(\dot{u}_0 + \dot{u}_1) + k_1 u_1 = -m_1\ddot{u}_0(t),$$

которое описывает движения абсолютно жесткого тела, установленного на фрикционно-маятниковых опорах.

Систему уравнений (11)–(13) можно представить в матричной форме

$$\mathbf{M\ddot{U}} + \mathbf{C\dot{U}} + \mathbf{KU} = -\mathbf{MI}\,(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1), \quad (14)$$

где $\mathbf{M} = diag(m_1, m_2, ..., m_n)$ – диагональная матрица масс;

I – единичный вектор влияния;

C – матрица затухания.

Матрица жесткости и векторы перемещений, скоростей и ускорений представляются в виде

$$\mathbf{K} = \begin{bmatrix} k_1 & -k_2 & 0 & \cdots & \cdots & 0 \\ -k_2 & k_2+k_3 & -k_3 & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & -k_3 & k_3+k_4 & -k_4 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & \cdots & -k_{n-1} & k_n \end{bmatrix},\ \mathbf{U} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ \vdots \\ u_n \end{Bmatrix},\ \dot{\mathbf{U}} = \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \\ \vdots \\ \dot{u}_n \end{Bmatrix},\ \ddot{\mathbf{U}} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \vdots \\ \ddot{u}_n \end{Bmatrix}. \quad (15)$$

Матрицу затухания в (14), соответствующей верхней части здания в первом приближении, можно принять пропорционально матрице масс

$$\mathbf{C} = diag(m_2, m_3, ..., m_n) \times a,$$

где a – коэффициент пропорциональности.

С целью численного моделирования задачи по расчету сейсмоизолированного здания с одномаятниковыми скользящими опорами используем метод последовательных аппроксимаций [2, 3], в котором скорость и ускорения, соответствующие моменту времени t_n, представляются в виде

$$\ddot{u}_n = \frac{\alpha_1}{\tau_n^2}(u_n - u_{n-1}) - \frac{\alpha_2}{\tau_n}\dot{u}_{n-1} - \alpha_3\ddot{u}_{n-1}, \quad (16)$$

$$\dot{u}_n = \frac{\beta_1}{\tau_n}\left(u_n - u_{n-1}\right) - \beta_2 \dot{u}_{n-1} - \tau_n \beta_3 \ddot{u}_{n-1}, \quad n = 1, 2, ..., N, \tag{17}$$

здесь τ_n – шаг интегрирования на отрезке времени $[t_{n-1}, t_n]$;

α_j, β_j – коэффициенты аппроксимации [3–6].

Подставляя (16) и (17) в (11), получим

$$\begin{aligned} & m_1\left[\frac{\alpha_1}{\tau_n^2}\left(u_{1,n} - u_{1,n-1}\right) - \frac{\alpha_2}{\tau_n}\dot{u}_{1,n-1} - \alpha_3 \ddot{u}_{1,n-1}\right] + \\ & + c_1\left[\frac{\beta_1}{\tau_n}\left(u_{1,n} - u_{1,n-1}\right) - \beta_2 \dot{u}_{1,n-1} - \tau_n \beta_3 \ddot{u}_{1,n-1}\right] + \\ & + c_0\left[\frac{\beta_1}{\tau_n}\left(u_{1,n} - u_{1,n-1}\right) - \beta_2 \dot{u}_{1,n-1} - \tau_n \beta_3 \ddot{u}_{1,n-1}\right] \times \operatorname{sgn}(\dot{u}_0 - \dot{u}_1) + \\ & + k_1 u_{1,n} - k_2 u_{2,n} = -m_1 \ddot{u}_0(t_n), \\ & k_1 = Q/R,\ k_2 = 2 \times 12EI/h_2^3. \end{aligned} \tag{18}$$

Уравнение (18) можно представить в виде

$$-a_{11}u_{1,n} - a_{12}u_{2,n} = m_1 \times us_{1,n-1} + c_1 \times sk_{1,n-1} + c_0 \times sk_{1,n-1} \times \operatorname{sgn}(\dot{u}_0 + \dot{u}_1) - m_1 \ddot{u}_0(t_n), \tag{19}$$

здесь

$$a_{11} = m_1 \frac{\alpha_1}{\tau_n^2} + \frac{\beta_1}{\tau_n}\left(c_1 + c_0\right) + k_1, \quad a_{12} = k_2,$$

$$us_{1,n-1} = \frac{\alpha_1}{\tau_n^2} u_{1,n-1} + \frac{\alpha_2}{\tau_n}\dot{u}_{1,n-1} + \alpha_3 \ddot{u}_{1,n-1},$$

$$sk_{1,n-1} = \frac{\beta_1}{\tau_n} u_{1,n-1} + \beta_2 \dot{u}_{1,n-1} + \tau_n \beta_3 \ddot{u}_{1,n-1}.$$

Проведя аналогичную процедуру к уравнению (12), получаем

$$-a_{j,i-1}u_{j-1,n} + a_{jj}u_{j,n} - a_{jj+1}u_{j+1} = m_j \times us_{j,n-1} + c_j \times sk_{j,n-1} - m_j(\ddot{u}_0 + \ddot{u}_1), \tag{20}$$

здесь

$$a_{jj-1} = k_j, \quad a_{jj} = m_1 \frac{\alpha_1}{\tau_n^2} + c_1 \frac{\beta_1}{\tau_n} + k_j + k_{j+1}, \quad a_{jj+1} = k_{j+1},$$

$$us_{j,n-1} = \frac{\alpha_1}{\tau_n^2} u_{j,n-1} + \frac{\alpha_2}{\tau_n}\dot{u}_{j,n-1} + \alpha_3 \ddot{u}_{j,n-1},$$

$$sk_{j,n-1} = \frac{\beta_1}{\tau_n} u_{j,n-1} + \beta_2 \dot{u}_{j,n-1} + \tau_n \beta_3 \ddot{u}_{j,n-1},$$

$$j = 2, 3, ..., n - 1.$$

Дифференциальное уравнение (13) с использованием аппроксимирующих формул (16) и (17) приводится к следующему виду

$$-a_{nn-1}u_{n-1,n}+a_{n,n}u_{n,n}=m_n\times us_{n,n-1}+c_n\times sk_{n,n-1}-m_n(\ddot{u}_0+\ddot{u}_1), \tag{21}$$

где

$$a_{nn-1}=k_n,\quad a_{nn}=m_n\frac{\alpha_1}{\tau_n^2}+c_n\frac{\beta_1}{\tau_n}+k_n,$$

$$us_{n,n-1}=\frac{\alpha_1}{\tau_n^2}u_{n,n-1}+\frac{\alpha_2}{\tau_n}\dot{u}_{n,n-1}+\alpha_3\ddot{u}_{n,n-1},$$

$$sk_{n,n-1}=\frac{\beta_1}{\tau_n}u_{j,n-1}+\beta_2\dot{u}_{n,n-1}+\tau_n\beta_3\ddot{u}_{n,n-1}.$$

Полученные алгебраические уравнения (19)–(21) можно представить в матричной форме:

$$\mathbf{AU}=\mathbf{B}, \tag{22}$$

$$\mathbf{A}=\begin{bmatrix} a_{11} & -a_{12} & 0 & \dots & 0 & 0\\ -a_{21} & a_{22} & -a_{23} & \dots & 0 & 0\\ 0 & -a_{32} & a_{33} & -a_{34} & \dots & 0\\ . & . & . & . & . & .\\ 0 & 0 & \dots & \dots & -a_{n,n-1} & a_{nn}\end{bmatrix},\quad \mathbf{U}=\begin{Bmatrix} u_1\\ u_2\\ u_3\\ \dots\\ u_n\end{Bmatrix},\quad \mathbf{B}=\begin{Bmatrix} b_1\\ b_2\\ b_3\\ \dots\\ b_n\end{Bmatrix}, \tag{23}$$

$$b_1=m_1\times us_{1,n-1}+c_1\times sk_{1,n-1}+c_0\times sk_{1,n-1}\times\operatorname{sgn}(\dot{u}_0-\dot{u}_1)-m_1\ddot{u}_0(t_n),$$

$$b_j=m_j\times us_{j,n-1}+c_j\times sk_{j,n-1}-m_1(\ddot{u}_0+\ddot{u}_1),\quad j=2,3,\dots,n-1,$$

$$b_n=m_n\times us_{n,n-1}+c_n\times sk_{n,n-1}-m_n(\ddot{u}_0+\ddot{u}_1).$$

Система алгебраических уравнений (22) решается на каждом шаге по времени. Видно, что матрица **A** является ленточной, поэтому для ее решения можно использовать итерационный метод Зейделя.

Пример

Исследование динамической модели здания от действия мгновенного импульса. В качестве примера рассматривается 10-этажное каркасное здание со следующими геометрическими данными: размеры в плане – 18 × 36 м; сетка колонн – 6 × 6 м: высота этажа – 3 м, высота здания – 30 м. На опорной части здания установлены 28 фрикционно-маятниковых опор. Суммарная масса и суммарный вес здания соответственно равны:

$$\text{М} = 9 \times 51{,}79 + 2 \times 49{,}12 = 564{,}35 \text{ тс}\cdot\text{с}^2/\text{м},\ Q = \text{М} \times 9{,}81 = 5536{,}27 \text{ тс}.$$

Изгибная жесткость и коэффициенты жесткости стоек и фрикционной опоры соответственно равны

$$EI=2\times10^6\frac{0{,}5\times0{,}5^3}{12};\quad k=\frac{12EI}{h^3};\quad k_o=\frac{QR}{N_k},$$

где R – радиус сферической поверхности опоры; $N_k = 28$ – количество опор.

На основе изложенной математической модели разработаны алгоритм и компьютерная программа **FPB-1** (Friction pendulum bearings) и получены результаты для модели здания М1 – без сейсмоизоляции и модели М2 – с фрикционными опорами. Результаты для М2 получены при $\mu = 0{,}1$, $R = 5$ м, $\xi = 0{,}02$ и при шаге численного интегрирования $\tau = 0{,}01$ с. С целью анализа сходимости и точности результатов были проведены численные эксперименты при различных значениях шага по времени.

На рис. 3 приведены графики перемещения масс m_1 (кривая 2) и m_{10} (кривая 1) модели М1, а также опорной массы $m_b = m_1$ (кривая 4) и массы m_{11} (кривая 3) модели М2. В табл. 1 приведены максимальные значения опрокидывающего момента и поперечной силы в опорной части, а также максимальные значения перемещения, скорости и ускорения, соответствующие массе перекрытия.

Сравнение результатов показывает, что применение сейсмоизоляции в виде фрикционно-маятниковых опор (модель М2) приводит к значительному уменьшению внутренних усилий в опорной части, а также к уменьшению скорости и ускорения в верхней части здания по сравнению с моделью М1. При этом несколько увеличиваются перемещения как в нижней, так и верхней частях исследуемого объекта.

Вывод

Разработаны математическая модель и алгоритм расчета, которые позволяют исследовать сейсмоизолированные здания при различных воздействиях, в том числе сейсмических в виде заданной акселерограммы землетрясения. В результате численного моделирования динамической задачи здания с применением метода последовательных аппроксимаций

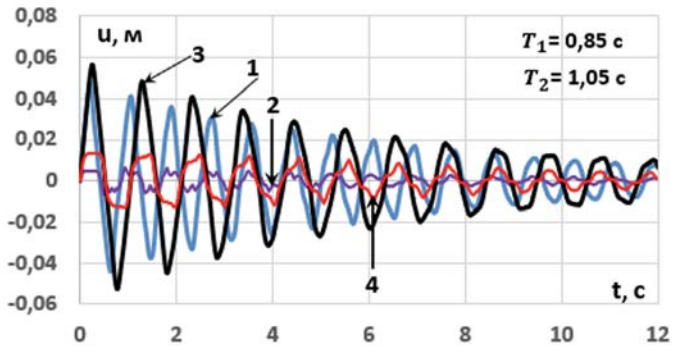


Рис. 3. Сравнение результатов колебания модели здания
Fig. 3. Comparison of vibration results of the building model

Таблица 1

Сравнение результатов

Table 1

Comparison of the results

Модель	M_{max}, тм	Q_{max}, т	u_{max}, м	$\dot{u}_{max}$, м/с	$\ddot{u}_{max}$, м/с^2
М1	$6{,}25 \times 10^4$	$4{,}72 \times 10^3$	$4{,}75 \times 10^{-2}$	0,346	9,01
М2	$3{,}69 \times 10^4$	$2{,}53 \times 10^3$	$5{,}63 \times 10^{-2}$	0,255	5,97

разработана компьютерная программа и получены результаты, которые сопоставлены с данными аналогичной модели без сейсмозащиты. Применение сейсмоизоляции в виде фрикционно-маятниковых опор приводит к значительному уменьшению внутренних усилий в сечениях исследуемого объекта по сравнению с аналогичным объектом без сейсмоизоляции.

Список литературы

1. Свод правил. Здания сейсмостойкие и сейсмоизолированные. Правила проектирования. Москва: Минрегион России; 2013.
2. *Ozer M.* The linear formulation for the equations of the dynamic responses of rigid and flexible structures supported by friction pendulum sliding (fps) bearings. In: 13th World Conference on Earthquake Engineering [internet]; 2004 August 1–6; Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1675. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1675.pdf
3. *Kelly J.M.* Aseismic base isolation: Review and bibliography. Soil Dyn. Earthq. Eng. 1986;5(4):202–216. https://doi.org/10.1016/0267-7261(86)90006-0
4. *Низомов Д.Н.* Методы прямого интегрирования дифференциальных уравнений движения дискретных систем. В: Строительство и архитектура: сб. науч. тр. Таджикского технического университета. Душанбе: ТТУ; 1992. Вып. 2, с. 39–46.
5. *Низомов Д.Н.* Численные методы решения динамических задач строительной механики. Изв. АН Респ. Тадж. Отделение физико-математических, химических, геологических и технических наук. 1993;(1):62–72.
6. *Низомов Д.Н.* Проблемы сейсмостойкого строительства в Таджикистане. Строительство и архитектура. 2010;(5):25–27.
7. *Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Каландарбеков И.И.* Численное моделирование динамической системы «платформа – модель – здания». Вестник гражданских инженеров. 2018;(3):66–72.
8. *Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Ходжибоев А.А.* Концепция сейсмоизоляции как стратегия в области сейсмостойкого строительства. В: Практика, проблемы и перспективы повышения качества проектирования, строительства и производства строительных материалов. Материалы респ. конф.; 2016; Душанбе; 2016, с. 139–147.
9. *Низомов Д.Н., Каландарбеков И., Ходжибоев А.А.* Численный анализ модели сейсмоизолированного многоэтажного здания. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2017;(3):16–20.
10. *Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.* Численное моделирование сейсмоизолированных зданий с сухим трением. Доклады Академии наук Республики Таджикистан. 2018;61(1):47–53.
11. *Низомов Д.Н., Каландарбеков И.К., Каландарбеков И.И.* Исследования свободных колебаний зданий с учетом сейсмоизоляции. Труды Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии АН Респ. Таджикистан. Душанбе, с. 182–189.

References

1. A set of rules. Buildings are earthquake-resistant and earthquake-insulated. Design rules. Moscow: Ministry of Regional Development of Russia; 2013. (In Russian).
2. *Ozer M.* The linear formulation for the equations of the dynamic responses of rigid and flexible structures supported by friction pendulum sliding (fps) bearings. In: 13th World Conference on Earthquake Engineering [internet]; 2004 August 1–6; Vancouver, B.C., Canada, Paper No. 1675. Available at: https://www.iitk.ac.in/nicee/wcee/article/13_1675.pdf
3. *Kelly J.M.* Aseismic base isolation: Review and bibliography. Soil Dyn. Earthq. Eng. 1986;5(4):202–216. https://doi.org/10.1016/0267-7261(86)90006-0
4. *Nizomov D.N.* Methods of direct integration of differential equations of motion of discrete systems. In: Construction and architecture. Collection of scientific works of the Tajik Technical University. Dushanbe: Tajik Technical University; 1992. Issue 2, pp. 39–46. (In Russian).

5. *Nizomov D.N.* Numerical methods for solving dynamic problems of structural mechanics. Izvestiya Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan. Otdelenie fiziko-matematicheskikh, khimicheskikh, geologicheskikh I tekhnicheskikh nauk = News of the National Academy of Sciences of Tajikistan. Department of physical, mathematical, chemical, geological and technical sciences. 1993;(1):62–72. (In Russian).
6. *Nizomov D.N.* Problems of earthquake–resistant construction in Tajikistan. Stroitel'stvo i arkhitektura = Construction and Architecture. 2010;(5):25–27. (In Russian).
7. *Nizomov D.N., Kalandarbekov I., Kalandarbekov I.I.* Numerical modeling of the dynamic system "platform – model – buildings". Vestnik grazhdanskikh inzhenerov = Bulletin of Civil Engineers. 2018;(3):66–72. (In Russian).
8. *Nizomov D.N., Kalandarbekov I., Khodzhiboev A.A.* The concept of seismic isolation as a strategy in the field of earthquake-resistant construction. Practice, problems and prospects of improving the quality of design, construction and production of building materials. Materials of the republican conference; 2016; Dushanbe; 2016, pp. 139–147. (In Russian).
9. *Nizomov D.N., Kalandarbekov I., Khodzhiboyev A.A.* Numerical analysis of a model of a seismically insulated multi-storey building. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety. 2017;(3):16–20. (In Russian).
10. *Nizomov D.N., Kalandarbekov I.K., Kalandarbekov I.I.* Numerical modeling of seismically insulated buildings with dry friction. Doklady Akademii nauk Respubliki Tadzhikistan = Reports of the National Academy of Sciences of Tajikistan. 2018;61(1):47–53. (In Russian).
11. *Nizomov D.N., Kalandarbekov I.K., Kalandarbekov I.I.* Studies of free vibrations of buildings taking into account seismic isolation. Proceedings of the Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology of the Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan. Dushanbe, pp. 182–189. (In Russian).

Информация об авторах / Information about the authors

Джахонгир Низомович Низомов, д-р техн. наук, профессор, член-корреспондент НАНТ, заведующий лабораторией сейсмостойкости зданий и сооружений Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, Душанбе
e-mail: tiees@mail.ru
Djahongir N. Nizomov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, Corresponding Member of NAST, Head of the Laboratory of Earthquake Resistance of Buildings and Structures, Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology of NAST, Dushanbe
e-mail: tiees@mail.ru

Абдусамад Мирвафоевич Сангинов✉**,** канд. техн. наук, ведущий научный сотрудник лаборатории сейсмостойкости зданий и сооружений Института геологии, сейсмостойкого строительства и сейсмологии НАНТ, Душанбе
e-mail: samad80@mail.ru
Abdusamad M. Sanginov✉**,** Cand. Sci. (Engineering), Leading Researcher, Laboratory of Earthquake Resistance of Buildings and Structures, Institute of Geology, Earthquake-Resistant Construction and Seismology of NAST, Dushanbe
e-mail: samad80@mail.ru

✉ Автор, ответственный за переписку / Corresponding author

УДК 624.046
https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-155-167 EDN: YGYKIE

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ УРАВНЕНИЯ ВТОРОГО РОДА В ЗАДАЧАХ РАСЧЕТА НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ ПРИ ПРОИЗВОЛЬНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ И ХАРАКТЕРЕ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАВИСИМОСТЕЙ

Ю.Т. ЧЕРНОВ, д-р техн. наук

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

Аннотация

Введение. Разработка методов расчета нелинейных систем является актуальной областью исследования в связи с тем, что линейная теория не всегда позволяет достоверно описать свойства динамических систем, а для целого ряда случаев линейное приближение дает лишь очень грубое представление о рассматриваемых процессах.

Цель. При расчете линейных систем и записи разрешающих уравнений для нелинейных систем используются передаточные и импульсные переходные функции линейных «порождающих» систем дифференциальных уравнений. Подобный подход по сравнению с традиционным методом «нормальных форм» позволяет значительно упростить алгоритм расчета, исключив из него несколько этапов и представить решение в виде разложения по формам собственных колебаний линейных систем непосредственно относительно обобщенных координат.

Материалы и методы. В статье приведен разработанный метод и алгоритм расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы при произвольных динамических воздействиях и характере физической нелинейности. В качестве разрешающих уравнений рассматриваются нелинейные интегральные уравнения второго рода, к которым сводятся системы нелинейных дифференциальных уравнений колебаний. Решение строится шагами по времени, величина которого в том числе определяет точность решения и характер численного алгоритма.

Результаты. Основные расчетные зависимости представлены в статье в обобщенном виде и удобны для численного моделирования. Приводятся решения для нелинейной системы с одной степенью свободы при кубической зависимости «реакция–перемещение» и системы с одной и двумя степенями свободы с демпфером вязкого трения. В обоих случаях построенное решение содержит все особенности нелинейных систем. В частности, скачок (переход) с верхней возрастающей ветви на нижнюю, устойчивую, и связанное с этим возбуждение свободных колебаний.

Выводы. Как показали результаты расчетов, возникновение в колебательных системах нелинейных эффектов весьма положительно сказывается на поведении динамических систем, в частности, в резонансных режимах.

Ключевые слова: интегральные уравнения второго рода, нелинейная динамическая система, выключающаяся связь, элемент с нелинейной характеристикой, импульсная переходная функция, передаточная функция, «порождающая» система

Для цитирования: Чернов Ю.Т. Интегральные уравнения второго рода в задачах расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы при произвольных динамических воздействиях и характере физических зависимостей. *Вестник НИЦ «Строительство».* 2023;38(3):155–167. https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-155-167

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

Финансирование
Исследование не имело спонсорской поддержки.

Конфликт интересов
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 14.06.2023
Поступила после рецензирования 06.07.2023
Принята к публикации 11.07.2023

INTEGRAL EQUATIONS OF THE SECOND KIND IN DYNAMIC ANALYSIS OF NONLINEAR SYSTEMS WITH A FINITE NUMBER OF DEGREES OF FREEDOM UNDER ARBITRARY DYNAMIC LOADING AND MATERIAL DEPENDENCIES

Yu.T. CHERNOV, Dr. Sci. (Engineering)
Moscow State University of Civil Engineering, Yaroslavskoye Shosse, 26, Moscow, 129337, Russian Federation

Abstract

Introduction. Development of computational methods for nonlinear systems possesses a significant potential, considering that linear theory sometimes fails to accurately describe the properties of dynamic systems, and the linear approximation gives only a very rough idea of real processes for a number of cases.

Aim. Calculating linear systems and deriving the resulting equations for nonlinear systems involves impulse response and transfer functions of linear "generating" systems of differential equations. Such an approach in comparison with the traditional method of the so-called normal forms enables the calculation algorithm to be simplified considerably, avoiding several stages and presenting the solution by means of the normal mode method for linear systems directly with respect to the generalized coordinates.

Materials and methods. The paper presents a method and an algorithm developed for the calculation of nonlinear systems with a finite number of degrees of freedom under arbitrary dynamic loading and material nonlinearity. Systems of nonlinear differential equations were reduced to nonlinear integral equations of the second kind, considered as resulting equations. The solution was developed in time steps, the value of which, among other things, determines the accuracy of the solution and the nature of the computational algorithm.

Results. The paper presents main computational dependencies in a generalized form, convenient for numerical simulation. The author provides solutions for a nonlinear system with one degree of freedom and a cubic reaction-displacement relation, as well as for a system with one and two degrees of freedom with a viscous damper. In both cases, the developed solution contains all properties of nonlinear systems, including the jump (transition) from the upper ascending branch to the lower, stable one, and the associated excitation of free oscillations.

Conclusions. According to the calculations, the occurrence of nonlinear effects in oscillating systems makes positive impact on their behavior, in resonant modes in particular.

Keywords: integral equations of the second kind, nonlinear dynamic system, lock-out brace, nonlinear element, impulse response function, transfer function, "generating" system

For citation: Chernov Yu.T. Integral equations of the second kind in dynamic analysis of nonlinear systems with a finite number of degrees of freedom under arbitrary dynamic loading and material dependencies. *Vestnik NIC Stroitel'stvo = Bulletin of Science and Research Center of Construction*. 2023;38(3):155–167. (In Russian). https://doi.org/10.37538/2224-9494-2023-3(38)-155-167

Author contribution statements
The author takes responsibility for all the aspects of the article.

Funding
No funding support was obtained for the research.

Conflict of interest
The author declares no conflict of interest.

Received 14.06.2023
Revised 06.07.2023
Accepted 11.07.2023

Введение

Методы исследования нелинейных колебаний систем, связанные с преобразованием нелинейных уравнений движения систем с конечным числом степеней свободы к нелинейным интегральным уравнениям второго рода, достаточно широко распространены в научно-технической литературе [1–3]. В основном речь идет о построении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ) и их анализе.

Между тем, воспользовавшись импульсными переходными функциями (ИПФ) исходных линейных «порождающих» уравнений, нелинейные дифференциальные уравнения могут быть записаны в виде систем нелинейных интегральных уравнений второго рода, которые, по существу, и определяют полное решение исходной системы в виде суммы двух интегралов типа свертки. Один из возможных алгоритмов вычисления подобных интегралов дан, в частности, в статье [4].

При построении решений системы линейных «порождающих» уравнений колебаний использовались фундаментальные зависимости для линейных систем общего вида, приведенные в [5], и несколько более детально для систем с конечным числом степеней свободы в [3].

Общая схема и алгоритм расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы проиллюстрированы на примере расчета системы с двумя степенями свободы (рис. 1).

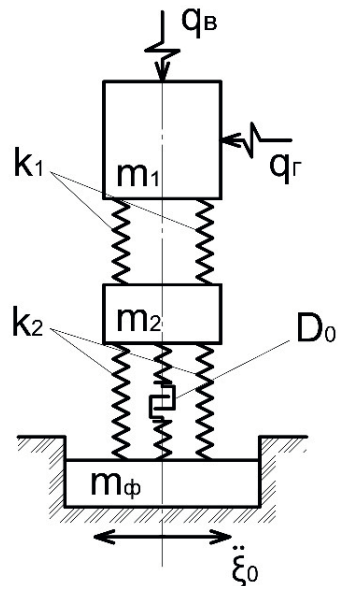
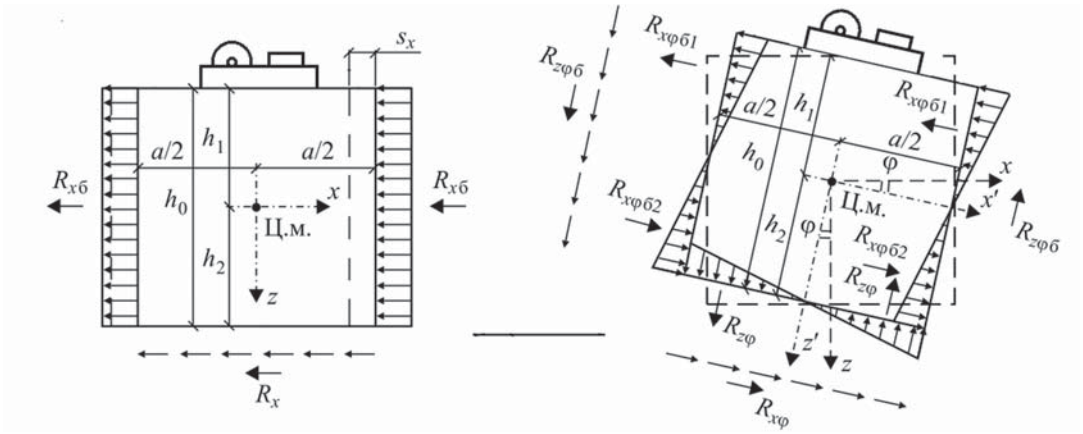


Рис. 1. Расчетная схема системы с двумя степенями свободы: k_i – жесткости связей; D_0 – демпфер вязкого трения
Fig. 1. Computational scheme of a system with two degrees of freedom: k_i – bracing stiffness; D_0 – viscous damper



а б

Рис. 2. Реакции в системе «фундамент-грунт» при горизонтальных (*а*) и вращательных (*б*) колебаниях
Fig. 2. Reactions in the "foundation-soil" system under horizontal (*а*) and rotational (*б*) oscillations

Сходимость, устойчивость и точность решений нелинейных систем, построенных используя, в частности, принятый в статье алгоритм, оценивались по результатам расчета двух нелинейных систем с одной степенью свободы.

Стоит отметить, что принятая расчетная схема достаточно широко используется при расчетах различных типов виброзащитных систем: виброизоляции, динамических гасителей колебаний и т. п. – с линейными и нелинейными характеристиками. Подобный алгоритм позволил записать решения линейных уравнений практически в замкнутом виде [2] и в качестве второго примера – решение уравнений плоских горизонтально-вращательных колебаний массивных тел (фундаментов), в том числе заглубленных в грунт [1] (рис. 2).

Материалы и методы

Процесс построения полного алгоритма расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы можно разделить на несколько этапов.

На начальном этапе дифференциальные уравнения колебаний систем при нелинейной зависимости «жесткость–перемещение» следует представить в виде (1), записав нелинейные составляющие в правой части:

$$\begin{cases} m_1\ddot{y}_1 + \left(1 + 2\nu_1\dfrac{d}{dt}\right)k_1(y_1 - y_2) = q_1(t) + \Phi_1(y_1, y_2), \\ m_2\ddot{y}_2 - \left(1 + 2\nu_1\dfrac{d}{dt}\right)k_1(y_1 - y_2) + \left(1 + 2\nu_2\dfrac{d}{dt}\right)k_2 y_2 = q_2(t) - \Phi_1(y_1, y_2) + \Phi_2(y_2); \end{cases} \quad (1)$$

где для дальнейшего сокращения записей обозначено:

$$\Phi_1(y_1, y_2) = \left(1 + 2\nu_1\frac{d}{dt}\right)[k_1 - c_1(\Delta y)](y_1 - y_2);$$
$$\Phi_2(y_2) = \left(1 + 2\nu_2\frac{d}{dt}\right)[k_2 - c_2(y_2)]y_2. \quad (2)$$

k_1, k_2 – жесткости упругих связей;
v_1, v_2 – коэффициент затухания в упругих связях;
$\Delta y = y_1 - y_2$.

Передаточные (ПФ) и импульсные переходные (ИПФ) функции этой системы определяют вид интегральных уравнений, которые, по существу, и являются решением системы нелинейных дифференциальных уравнений. Значение этих функций вычисляют из расчета линейной («порождающей») системы уравнений при:

$$q_i(t) = Q_i e^{i\omega t} \text{ – силовых;}$$
$$q_i(t) = -\ddot{\xi}_0 M e^{i\omega t} \text{ – кинематических воздействиях.} \quad (3)$$

где Q_i – амплитудные значения усилий;
$\ddot{\xi}_0$ – закон смещения основания;
ω – частота вынужденных колебаний.

В матричном виде эту систему следует записать так:

$$M\vec{\ddot{y}} + C\vec{y} + K\vec{y} = \vec{Q}e^{i\omega t}(-\ddot{\xi}_0 M e^{i\omega t}); \quad (4)$$

где

$$M = \begin{vmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{vmatrix}, K = \begin{vmatrix} k_1 & -k_1 \\ -k_1 & k_1 + k_2 \end{vmatrix} \quad (5)$$

– матрицы масс и жесткости.

Используя известные зависимости [2, 5], решения подобных систем могут быть представлены в виде разложения по формам собственных колебаний при том, что каждая составляющая полного решения определяется из решения систем уравнений – по структуре систем с одной степенью свободы, диссипативные силы в которых можно учесть, добавив в каждое из них дополнительные слагаемые пропорциональные скорости колебаний.

В работе, в частности, используется модифицированная модель Фойгта с основным параметром γ – коэффициентом неупругого сопротивления. Такая модель принята во многих нормативных документах [6, 7], где приводятся также значения этого параметра для различных материалов и сред.

Подобная схема построения алгоритмов расчета более детально дана на примере расчета системы (1).

Следующий этап расчета – вычисление ПФ и ИПФ системы линейных уравнений (4).

Следуя общей схеме вычисления передаточных функций линейной системы [2], подставим в (4):

$$\vec{y} = \vec{Y}e^{i\omega t} = \vec{Q}\vec{H}e^{i\omega t} \text{ – при силовом и}$$
$$\vec{y}_к = \vec{Y}_к e^{i\omega t} = -\ddot{\xi}_0 M\vec{H}e^{i\omega t} \text{ – при кинематическом воздействии,} \quad (6)$$

где $\vec{H}$ – передаточная функция, и, после сокращения на $e^{i\omega t}$, запишем систему уравнений относительно элементов вектора $\vec{Y}$:

$$[(1 + i\omega 2v_1)k_1 - m_1\omega^2]Y_1 - (1 + i\omega 2v_1)k_1 Y_2 = Q_1;$$
$$-(1 + i\omega 2v_1)k_1 Y_1 + [(1 + i\omega 2v_1)k_1 + (1 + i\omega 2v_2)k_2 - m_2\omega^2]Y_2 = Q_2.$$

Из решения которой следует:

$$Y_1 = \frac{Q_1(k_1 + k_2 - m_2\omega^2) + Q_2 k_1}{D} = \frac{Q_1\Phi_{11} + Q_2\Phi_{12}}{D};$$
$$Y_2 = \frac{Q_1 k_1 + Q_2(k_1 - m_1\omega^2)}{D} = \frac{Q_1\Phi_{21} + Q_2\Phi_{22}}{D}. \quad (7)$$

где Φ_{ij} – приближенная (без учета диссипативных сил) амплитуда перемещений i-й массы при действии единичной силы $1 \times e^{i\omega t}$ на j-ю массу;

D – определитель системы (4), который для сокращения выкладок удобно после некоторых преобразований записать в виде:

$$D = m_1 m_2\{\omega^4 - (h_1 + h_1 s_1 + 1)p_{01}^2\omega^2 + p_{01}^2 p_{02}^2\} = m_1 m_2 N(\omega), \quad (8)$$

где $h_1 = \frac{m_1}{m_2}$; $s_1 = \frac{k_2}{k_1}$; $p_{01}^2 = \frac{k_1}{m_1}$; $p_{02}^2 = \frac{k_2}{m_2}$; $\frac{p_{02}^2}{p_{01}^2} = h_1 s_1$. (9)

Полагая в (8) $\omega = p$ и приравняв определитель к нулю, вычислим корни частотного уравнения (значения собственных частот) по формуле:

$$p_{2(1)}^2 = \left(\frac{\varphi_1}{2} \pm \sqrt{\frac{\varphi_1^2}{4} - h_1 s_1}\right) p_{01}^2, \quad (10)$$

где $\varphi_1 = h_1 + h_1 s_1 + 1$.

Следуя общей схеме построения ПФ [3, 5], определитель системы (4) и его производную по ω^2 запишем в виде:

$$D(\omega^2) = m_1 m_2(\omega^2 - p_1^2)(\omega^2 - p_2^2); \quad (11)$$

$$\frac{dD}{d\omega^2} = m_1 m_2[(\omega^2 - p_1^2) + (\omega^2 - p_2^2)]. \quad (12)$$

Общий алгоритм вычисления передаточных функций можно показать на примере системы (4). Для этого формулу для ПФ, записанную в виде

$$H(\omega^2) = \frac{L(p_i)}{m_1 m_2 \prod_{r=1}^{2}(\omega^2 - p_r^2)}, \quad (а)$$

где $L(p_i)$ – некоторая функция частоты.

Следует преобразовать и представить как сумму отдельных составляющих:

$$H(\omega^2) = \frac{L(\omega^2)}{D(\omega^2)} = \frac{1}{m_1 m_2}\sum_{r=1}^{2}\frac{K_r}{\omega^2 - p_r^2}; \quad (б)$$

где p_r – корни уравнения (8) (частоты собственных колебаний), т. е., по существу, в виде разложения по формам собственных колебаний «порождающей» системы, в которой коэффициенты K_r, следуя известной схеме [2], следует определять по формуле:

$$K_r = \frac{L(p_r^2)}{\left[\frac{d}{d\omega^2}D(\omega^2)\right]_{\omega^2 = p_r^2}} \quad (в)$$

Из (б) и (в) следуют общие зависимости для передаточных функций системы (4) также в виде разложения по формам собственных колебаний

$$H_{ij} = \frac{1}{m_1 m_2 (p_2^2 - p_1^2)} \sum_{r=1}^{2} (-1)^{r+1} \frac{L_{ij}(p_r^2)}{p_r^2 - \omega^2 + i\omega p_r^2 2\nu_r}, \tag{13}$$

где $L_{11} = k_1 + k_2 - m_2 p_r^2;\ L_{12} = L_{21} = k_1;\ L_{22} = k_1 - m_1 p_r^2.$ (14)

Последнее слагаемое в знаменателе в (13) позволяет учитывать диссипативные силы, используя наиболее подходящие для конкретных задач модели. Ранее уже было сказано, что в работе далее используется модифицированная гипотеза Фойгта при $\nu_r = \frac{\gamma_r}{2\omega}$.

Передаточные и импульсные переходные функции для общих случаев линейных систем определены в [2].

Для систем с конечным числом степеней свободы алгоритм расчета ИПФ можно несколько упростить, если учесть, что ПФ подобных систем определяются в виде суммы решений систем уравнений по форме систем с одной степенью свободы. В частности, для

$$\ddot{y}_r + \left(1 + \frac{\gamma_r}{p_r}\frac{d}{dt}\right) p_r^2 y = D_r e^{i\omega t}, \text{ при } r = 1...n, \tag{15}$$

где D_r – некоторая функция частоты p_r.

ИПФ уравнения (15) удобно записать, воспользовавшись одним из решений для свободных колебаний $y_r = D_r \frac{\dot{y}}{p_r} \sin p_r t$ и теоремой сохранения количества движения $S = m\dot{y}$, в окончательном виде так

$$k_r = D_r \frac{S}{p_r} e^{-\frac{\gamma}{2} p_r t} \sin p_r t. \tag{16}$$

Из (13) и (16) следуют такие общие зависимости для ИПФ системы (4)

$$K_{ij}(p_r) = \frac{1}{M(p_r)} \sum_{r=1}^{2} (-1)^{r+1} \frac{L_{ij}(p_r)}{p_r^*} e^{-n_r t} \sin p_r^* t = \sum_{r=1}^{2} (-1)^{r+1} H_{ij}(p_r)\, e^{-n_r t} \sin p_r^* t, \tag{17}$$

где $p_r^* = p_r \sqrt{\left(1 - \frac{\gamma_r^2}{4}\right)};\ n_r = \frac{\gamma_r}{2} p_r;\ M(p_r) = m_1 m_2 (p_2^2 - p_1^2);\ H_{ij}(p_r) = \frac{1}{M(p_r)} \frac{L_{ij}(p_r)}{p_r^*}.$ (18)

Определив ИПФ из решения системы линейных дифференциальных уравнений (4), решения нелинейной системы (1) можно записать в виде нелинейных интегральных уравнений второго рода. В частности, для несколько упрощенного варианта – при $c_1(\Delta y) = K_1$; $c_2(y_2) \neq K_2$, общее решение системы (1) будет определяться интегралами:

$$y_1(t) = y_{01}(t) + W_{01}(t)$$

где

$$y_{01}(t) = \int_0^t \left\{ \left(q_1(\tau) \sum_{r=1}^{2} (-1)^{r+1} H_{11}(p_r) + \right.\right. \tag{19}$$

$$\left.\left. + q_2(\tau) \sum_{r=1}^{2} (-1)^{r+1} H_{12}(p_r) \right) e^{-\frac{\gamma}{2} p_r (t-\tau)} \sin p_r^* (t-\tau) \right\} d\tau;$$

$$W_{01}(t)=\int_0^t\left\{\Phi_2(\tau)\sum_{r=1}^{2}(-1)^{r+1}H_{12}(p_r)\,e^{-\frac{\gamma}{2}p_r(t-\tau)}\sin p_r^*(t-\tau)\right\}d\tau; \tag{20}$$

$$y_{02}(t)=\int_0^t\left\{\left(q_1(\tau)\sum_{r=1}^{2}(-1)^{r+1}H_{21}(p_r)+\right.\right.$$
$$\left.\left.+q_2(\tau)\sum_{r=1}^{2}(-1)^{r+1}H_{22}(p_r)\right)e^{-\frac{\gamma}{2}p_r(t-\tau)}\sin p_r^*(t-\tau)\right\}d\tau; \tag{21}$$

$$W_{02}(t)=\int_0^t\left\{\Phi_2(\tau)\sum_{r=1}^{2}(-1)^{r+1}H_{22}(p_r)\,e^{-\frac{\gamma}{2}p_r(t-\tau)}\sin p_r^*(t-\tau)\right\}d\tau, \tag{22}$$

где y_{0i} и W_{0i} – соответственно решение линейной системы (4) и составляющие решений от «фиктивной» нагрузки. $\Phi_2(\tau)$ – по формуле (2).

При вычислении интегралов представляется оптимальным шаговый метод по времени с уточнением (итерацией) нелинейных зависимостей на каждом этапе. Если воспользоваться представлением подынтегральной функции $V=e^{-\frac{\gamma}{2}p(t-\tau)}\sin p(t-\tau)$ и соответственно ИПФ в виде сумм слагаемых, каждое из которых – произведения функций от t и τ, алгоритм расчета подобных систем можно записать в более компактном виде.

В частности, перемещения от фиктивной нагрузки в системе с одной степенью свободы

$$m\ddot{y}+\left(1+2\nu\frac{d}{dt}\right)ky=q(t)+\left(1+2\nu\frac{d}{dt}\right)[k-c(y)]y=q(t)+\varphi(y), \tag{23}$$

могут вычисляться по формулам [3]:

$$W(t)=\frac{1}{mp^*}[(B_0d_1+D_0d_2)F_2-(B_0d_2-D_0d_1)F_1]; \tag{24}$$

где

$$d_1=e^{-nt}\sin p^*t;\ d_2=e^{-nt}\cos p^*t;$$
$$F_1(t)=\int_0^t\varphi\ (y(\tau))\,e^{n\tau}\sin p^*\tau\,d\tau;$$
$$F_2(t)=\int_0^t\varphi\ (y(\tau))\,e^{n\tau}\cos p^*\tau\,d\tau; \tag{25}$$
$$B_0=1-\frac{\gamma^2}{4};\ D_0=\gamma;\ p_0^*=p_0\left(1-\frac{\gamma^2}{4}\right);n=\frac{\gamma p}{2}.$$

Алгоритмы построения решений (перемещений) системы нелинейных дифференциальных уравнений (1), записанных в виде сумм двух интегралов типа свертки (19)–(22), можно проиллюстрировать на примере уравнения (19). Воспользовавшись зависимостями (24),

(25), составляющие решения по первой форме собственных колебаний системы линейных «порождающих» уравнений следует записать в виде

$$y_{01}(t) = \int_0^t [q_1(\tau)H_{11}(p_1) + q_2(\tau)H_{12}(p_1)]\, e^{-n(t-\tau)} \sin p_1^*(t-\tau)\, d\tau = \frac{1}{p_1^*}\{d_1F_2(t) - d_2F_1(t)\}; \quad \text{(г)}$$

где $d_1 = e^{-nt} \sin p_1^* t\,;\; d_2 = e^{-nt} \cos p_1^* t\,;$ (д)

$$F_1(t) = H_{11} \int_0^t q_1(\tau)\, e^{n\tau} \sin p_1^* \tau\, d\tau + H_{12} \int_0^t q_2(\tau)\, e^{n\tau} \sin p_1^* \tau\, d\tau;$$

$$F_2(t) = H_{11} \int_0^t q_1(\tau)\, e^{n\tau}\, cos\, p_1^* \tau\, d\tau + H_{12} \int_0^t q_2(\tau)\, e^{n\tau} \cos p_1^* \tau\, d\tau; \quad \text{(е)}$$

$$B_0 \approx 1;\; D_0 \approx 0.$$

При вычислении перемещений по второй форме в (г) и (е) p_1^* следует заменить на p_2^* и поменять знак перед общим решением (г).

Точность построенных по формулам (24), (25) решений подобных систем оценивалась на примере уравнения (23) [8] при кубической зависимости «жесткость–перемещение» на нагрузки, возбуждаемые при работе виброактивного оборудования с вращающимися частями (насосы, вентиляторы и т. п.) при всех режимах – рабочем,
пуска

$$q(t) = Q_0 \frac{(at)^2}{\omega^2} sin \frac{\omega t^2}{2},$$

и остановки (26)

$$q(t) = Q_0 \frac{\omega - b(t-t_0)^2}{\omega^2} \sin\left(\omega t - \frac{b(t-t_0)^2}{2}\right),$$

где постоянные a и b определяют время пуска и остановки.

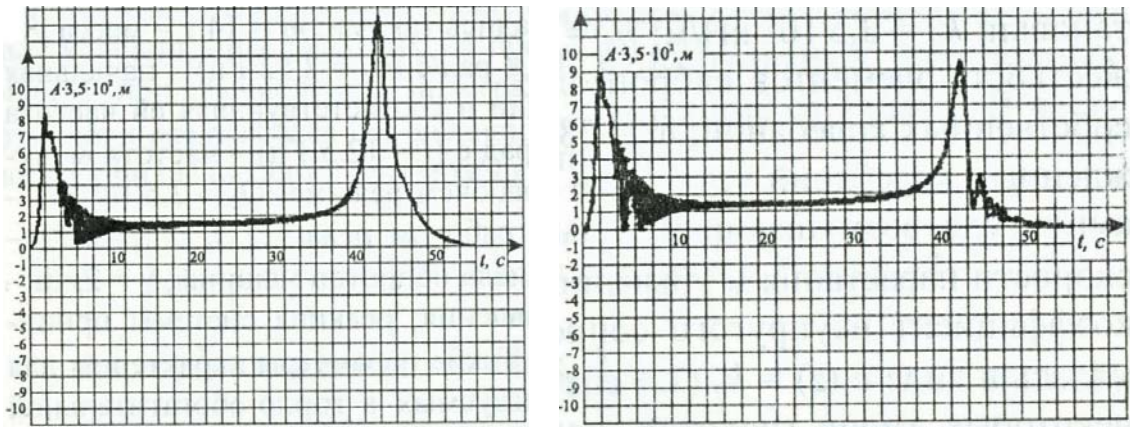
В принятом алгоритме расчета при вычислении интегралов и, следовательно, полного решения системы (1) в качестве основного параметра, определяющего, главным образом, точность решений, был принят интервал по времени $\Delta t = \frac{T_r}{N_r}$, где T_r – период колебаний, N_r – число разбиений. При $\Delta t = \frac{T}{25–35}$ погрешность решений по отношению к решениям при Δt, существенно меньше принятого, не превышала одного процента.

При достаточно малых значениях Δt возможно не уточнять величину нелинейной составляющей (не выполнять итерации), а при вычислении интегралов F_1, F_2 на каждом этапе принимать их средние значения.

Результаты

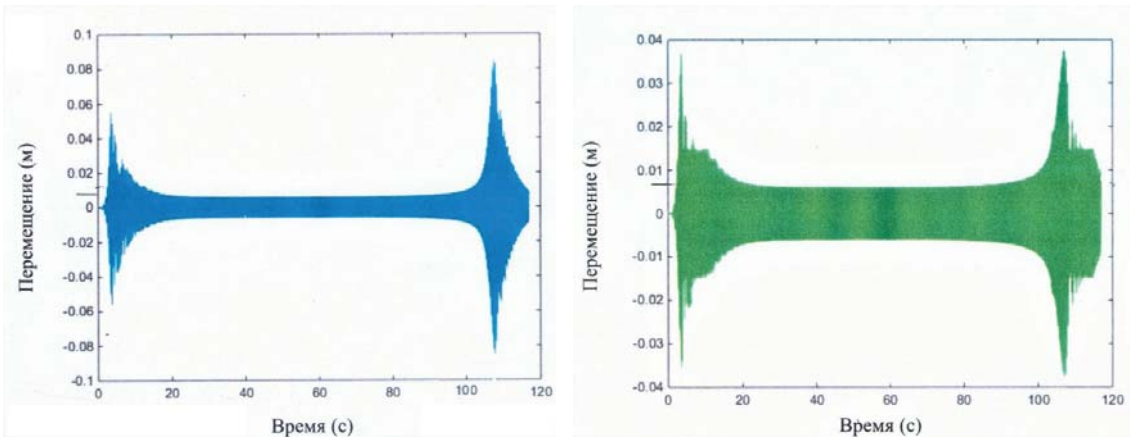
Подобный алгоритм был использован и при расчете системы с одной и двумя степенями свободы (рис. 2), дополнительная связь в которых включает демпфер вязкого трения [2]. Зависимости, построенные по результатам расчетов обеих систем, приведены на рис. 3–5.

В обоих случаях построенные решения учитывают все особенности, характерные для нелинейных систем, – срыв перемещений (при резонансе происходит переход с верхней возрастающей ветви на нижнюю – устойчивую) и связанное с этим возбуждение свободных колебаний.



а б

Рис. 3. Перемещения $y = A \times 10^3$(м): *а* – линейная система; *б* – система с кубической характеристикой
Fig. 3. Displacements $y = A \times 10^3$(m): *a* – linear system; *б* – cubic system



а б

Рис. 4. Перемещения, (м), в системе с одной степенью свободы: *а* – линейная система;
б – с демпфером вязкого трения
Fig. 4. Displacements, (m), in a system with one degree of freedom: *a* – linear system; *b* – with a viscous damper

Выводы:

– применение методов, основанных на передаточных и переходных функциях при расчетах динамических систем в линейной постановке, позволяет построить достаточно компактные алгоритмы динамического расчета систем с конечным числом степеней свободы при произвольных, в частности периодических, воздействиях, в том числе в зонах резонанса;

– подобный подход позволяет существенно сократить этапы расчета по сравнению с традиционным методом «нормальных форм», а решения записать непосредственно относительно обобщенных, а не главных координат также в виде разложения по собственным формам;

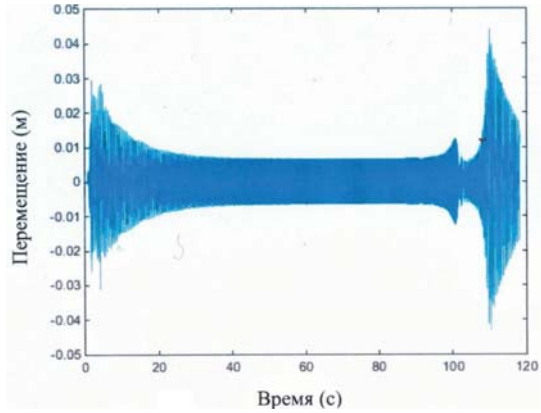


Рис. 5. Перемещения массы m_2 в системе с двумя степенями свободы
Fig. 5. Mass displacements m_2 in a system with two degrees of freedom

– позволяет упростить запись разрешающих интегральных уравнений, в том числе для нелинейных систем;

– общий метод и алгоритмы расчета проиллюстрированы в работе на примере системы с двумя степенями свободы, которая вместе с тем является основной расчетной схемой для многих систем виброзащиты (виброизоляции) с динамическими гасителями колебаний, выключающимися связями и т. п. как в линейных, так и в нелинейных системах при произвольных силовых или кинематических воздействиях;

– разрешающими уравнениями при решении задач динамического расчета нелинейных систем с конечным числом степеней свободы являются нелинейные интегральные уравнения второго рода, к которым сводятся дифференциальные уравнения;

– основными зависимостями, определяющими алгоритм расчета, являются импульсные переходные функции линейных «порождающих» уравнений, представленные в виде разложения по формам собственных колебаний непосредственно относительно обобщенных координат;

– как следует из вида интегральных уравнений, решение исходной системы заключается, по существу, в вычислении двух интегралов типа свертки – от основной и «фиктивной» нагрузок;

– определяющим при вычислении интегралов шагами по времени является интервал Δt, при значениях которого $\Delta t < \frac{T}{30}$, построенные решения (также в виде разложения по формам собственных колебаний порождающей системы) могут определяться как «практически точные», т. е. с заданной заранее погрешностью;

– сходимость и точность построенных решений оценивалась на примерах расчета двух нелинейных систем: с одной степенью свободы при кубической зависимости «перемещение – реакция» и систем с одной и двумя степенями свободы (рис. 1) с выключающейся связью с демпфером вязкого трения;

– построенные решения содержат все особенности, характерные для нелинейных систем, – срыв (скачок) перемещений при прохождении через резонанс и, что существенно, связанное с этим возбуждение свободных колебаний;

– представляется, что подобный алгоритм расчета может достаточно эффективно применяться при исследовании нелинейных систем с различными расчетными схемами, в том числе со многими степенями свободы.

Список литературы

1. *Волкова М.В., Чернов Ю.Т., Кбейли Д.* Расчет массивых фундаментов, заглубленных в грунт, под виброизолированное и невиброизолированное оборудование. Известия высших учебных заведений. Строительство. 2020;(7):5–12.
2. *Солодовников В.В.* Статистическая динамика линейных систем автоматического управления. Москва: Физматгиз; 1960.
3. *Чернов Ю.Т.* Вибрации строительных конструкций. Аналитические методы расчета. Основы проектирования и нормирования вибраций строительных конструкций, подвергающихся эксплуатационным динамическим воздействиям. 2-е изд., испр. и доп. Москва: Изд-во АСВ, 2011.
4. *Чернов Ю.Т., Новожилов А.И.* Передаточные и импульсные переходные функции в задачах динамического расчета массивных фундаментов и систем виброизоляции. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2006;(1):55–59.
5. *Розенвассер Е.Н.* Периодически нестационарные системы управления. Москва: Наука; 1973.
6. СП 26.13330.2012. Фундаменты машин с динамическими нагрузками. Актуализированная редакция СНиП 2.02.05-87. Москва: ФАУ «ФЦС»; 2012.
7. СП 413.1325800.2018. Здания и сооружения, подверженные динамическим воздействиям. Правила проектирования (с Изменением № 1). Москва: Стандартинформ; 2019.
8. *Чернов Ю.Т.* О выборе порождающих систем при исследовании нелинейных колебаний. Динамика строительных конструкций. Сб. научных трудов ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко. Москва; 1985, с. 22–23.
9. *Боголюбов Н.Н., Митропольский Ю.А.* Асимптотические методы в теории нелинейных колебаний. 2-е изд. Москва: Физматгиз; 1981.
10. *Вульфсон И.И., Коловский М.З.* Нелинейные задачи динамики машин. Москва: Машиностроение; 1968.
11. *Ивович В.А., Онищенко В.Я.* Защита от вибрации в машиностроении. Москва: Машиностроение; 1990.
12. *Коловский М.З.* Нелинейная теория виброзащитных систем. Москва: Наука; 1966.
13. *Петров И.А., Осипова М.В.* О двух методах расчета нелинейных систем с одной степенью свободы. Интернет-вестник ВолгГАСУ. 2012;(3). Режим доступа: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PetrovOsipova-2012_3(23).pdf
14. *Чернов Ю.Т., Романенко А.Б.* К расчету нелинейных систем виброизоляции. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2002;(4):34–38.
15. *Чернов Ю.Т., Зебилила М.* К расчету систем виброизоляции с демпферами вязкого трения. Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2018;(2):34–38.
16. *Diala U.H., Ezeh G.N.* Nonlinear demping for vibration isolation and control using semi active methods. SAVAP International. 2012;3(3):141–152.
17. *Khan W., Akhtar S., Hussain A.* Non-Linear time history analysis of tall structure for seismic load using damper. International Journal of Scientific and Research Publications. 2014;4(4):1–5.

References

1. *Volkova M.V., Chernov Yu.T., Kbeyli D.* Calculation of massive foundations buried in the ground, under vibration-insulated and non-vibration-insulated equipment. Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Stroitel'stvo = News of higher educational institutions. Construction. 2020;(7):5–12. (In Russian).
2. *Solodovnikov V.V.* Statistical dynamics of linear automatic control systems. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1960. (In Russian).
3. *Chernov Yu.T.* Vibrations of building structures. Analytical methods of calculation. Fundamentals of design and regulation of vibrations of building structures exposed to operational dynamic impacts. 2nd ed. Moscow: ASB Publ.; 2011. (In Russian).

4. *Chernov Yu.T., Novozhilov A.I.* Transfer and impulse transient functions in problems of dynamic calculation of massive foundations and vibration isolation systems. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety. 2006;(1):55–59. (In Russian).
5. *Rosenwasser E.N.* Periodically unsteady control systems. Moscow: Nauka Publ.; 1973. (In Russian).
6. SP 26.13330.2012. Foundations for machines with dynamic loads. Updated version of SNiP 2.02.05-87. Moscow: Federal Center for Rationing and Standardization; 2012. (In Russian).
7. SP 413.1325800.2018. The buildings and structures under dynamic actions. Design rules (with Change No. 1). Moscow: Standartinform Publ.; 2019. (In Russian).
8. *Chernov Yu.T.* On the choice of generating systems in the study of nonlinear oscillations. In: Dynamics of building structures. Collection of scientific papers of the V.A. Koucherenko TSNIISK. Moscow; 1985, pp. 22–23. (In Russian).
9. *Bogolyubov N.N., Mitropolsky Yu.A.* Asymptotic methods in the theory of nonlinear oscillations. 2nd ed. Moscow: Fizmatgiz Publ.; 1981. (In Russian).
10. *Wolfson I.I., Kolovsky M.Z.* Nonlinear problems of machine dynamics. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1968. (In Russian).
11. *Ivovich V.A., Onishchenko V.Ya.* Protection from vibration in mechanical engineering. Moscow: Mashinostroenie Publ.; 1990. (In Russian).
12. *Kolovsky M.Z.* Nonlinear theory of vibration protection systems. Moscow: Nauka Publ.; 1966. (In Russian).
13. *Petrov I.A., Osipova M.V.* On two methods for calculating nonlinear systems with one degree of freedom. Internet-Vestnik VolgGASU. 2012;(3). (In Russian). Available at: http://vestnik.vgasu.ru/attachments/PetrovOsipova-2012_3(23).pdf
14. *Chernov Yu.T., Romanenko A.B.* On the calculation of nonlinear vibration isolation systems. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety. 2002;(4):34–38. (In Russian).
15. *Chernov Yu.T., Zebilila M.* On the calculation of vibration isolation systems with viscous friction dampers. Seismostoikoe stroitel'stvo. Bezopasnost' sooruzhenii = Earthquake engineering. Constructions safety. 2018;(2):34–38. (In Russian).
16. *Diala U.H., Ezeh G.N.* Nonlinear damping for vibration isolation and control using semi–active methods. SAVAP International. 2012;3(3):141–152.
17. *Khan U., Akhtar S., Hussein A.* Nonlinear analysis of the time history of a high-rise structure under seismic load using a damper. International Journal of Scientific Publications. 2014;4(4):1–5.

Информация об авторе / Information about the author

Юрий Тихонович Чернов, д-р техн. наук, профессор, НИУ МГСУ, Москва
e-mail: jury.chernov@gmail.com
Yuri T. Chernov, Dr. Sci. (Engineering), Professor, National Research Moscow State University of Civil Engineering, Moscow
e-mail: jury.chernov@gmail.com

АО «НИЦ «Строительство» —
это более чем 95-летний опыт исследований и достижений в области строительной науки.

Мы – команда единомышленников, способных реализовать сложнейшие инженерные проекты.

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО» ПРЕДЛАГАЕТ ВЕСЬ СПЕКТР ИНЖИНИРИНГОВЫХ УСЛУГ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА

- ПРОЕКТИРОВАНИЕ
- ЭКСПЛУАТАЦИЯ
- ИЗЫСКАНИЯ
- СТРОИТЕЛЬСТВО

УЧЕБНЫЙ ЦЕНТР

АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ЦНИИПСК | НИИЖБ | НИИОСП

С 1927 ГОДА
95 ЛЕТ

повысить квалификацию специалистов и экспертов

пройти **обучение в аспирантуре**

подготовить **диссертацию в докторантуре**

защитить диссертацию на соискание ученой степени **кандидата наук,** на соискание ученой степени **доктора наук**

Учебный центр АО «НИЦ «Строительство» приглашает вас:

г. Москва,
2-я Институтская ул., д. 6

+7 (499) 174-73-84 | +7 (499) 174-73-80

www.cstroy.ru

motorina@cstroy.ru | smirnova@cstroy.ru

АО «НИЦ «Строительство» проводит подготовку специалистов на курсах повышения квалификации по очной и заочной формам:

- в области инженерных изысканий
- в области проектирования
- в области строительства
- по уникальным программам АО «НИЦ «Строительство»
- разработка индивидуальных программ обучения и учебно-тематических планов

Преподавательский состав **Учебного центра**

- лекции читают академики, действующие члены и члены-корреспонденты РААСН, лауреаты Премий Правительства РФ, заслуженные деятели науки и техники РФ, доктора и кандидаты технических наук
- учебный класс рассчитан на обучение до 75 человек одновременно. Оснащен системой кондиционирования и видеонаблюдения

ФОРМЫ ПОДГОТОВКИ ДИССЕРТАЦИИ В АО «НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО»

Набор в аспирантуру и докторантуру АО «НИЦ «Строительство» проводится по направлению **08.06.01** «Техника и технология строительства» по направлениям:

2.1.1	«Строительные конструкции, здания и сооружения»
2.1.2	«Основания и фундаменты, подземные сооружения»
2.1.5	«Строительные материалы и изделия»

В АО «НИЦ «Строительство» работает совет по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Защита диссертаций проводится по следующим научным специальностям:

2.1.1	«Строительные конструкции, здания и сооружения»
2.1.2	«Основания и фундаменты, подземные сооружения»
2.1.5	«Строительные материалы и изделия»

ПРИЕМ В АСПИРАНТУРУ НИЦ «СТРОИТЕЛЬСТВО» до 30 сентября 2023 года !

Научные специальности:

- 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения»
- 2.1.2 «Основания и фундаменты, подземные сооружения»
- 2.1.5 «Строительные материалы и изделия»

Обучение очное - 4 года
Подробно на сайте cstroy.ru

Наши контакты:

Центр подготовки кадров (глав. корпус, 4 этаж, к. 400 (5)
Моторина Екатерина Сергеевна
+7 (495) 602-00-70 доб. 1172, 8 (916) 307-75-80;

100+ TECHNO BUILD

X Международный
строительный форум
и выставка

3-6 ОКТЯБРЯ 2023
ЕКАТЕРИНБУРГ

forum-100.ru

Научное издание

Вестник НИЦ «Строительство»
Вып. 3(38) 2023

Фото обложки:
Главный корпус АО «НИЦ «Строительство»

Редактор выпуска Починина Н.Е.
Компьютерная верстка Чорненький С.И.

Дата выхода в свет: 29.09.2023 г. Формат 70×100/16
Бумага мелованная. Офсетная печать.
Тираж 500 экз. Заказ № 42161

Отпечатано с готового оригинал-макета
в типографии «Триада»
170034, Российская Федерация,
г. Тверь, пр. Чайковского, д. 9, оф. 514.
тел.: +7 910 647-49-85
e-mail: triadatver@yandex.ru
Свободная цена

НИЦ строительство
научно-исследовательский центр

ISSN: 2224-9494 (Print)
ISSN: 2782-3938 (Online)
Подписной индекс: 36569
АО «НИЦ «Строительство»
Москва, 2023