

e-ISSN: 2782-7445

p-ISSN: 2686-7818

ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

2026, №2 (33)

СЕТЕВОЕ
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ
ИЗДАНИЕ

*Expert:
theory and practice*

12+

АНО «ИССТЭ»
Тольятти/Tolyatti



Учредитель

Учредитель: Автономная некоммерческая организация "Институт судебной строительно-технической экспертизы" (АНО "ИСТЭ"), соучредители: ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.», Анпилов С.М., Матвеева М.М., Сорочайкин И.А.

Издаётся с 2019 г. Выходит 4 раз в год.
Префикс DOI: 10.51608/26867818

Сетевое издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ЭЛ № ФС 77-83498 от 24.06.2022 года.

Сетевое издание «Эксперт: теория и практика» включено в категорию К2 перечня ВАК Минобрнауки РФ ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук по научным специальностям:

- 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела (физико-математические науки) с 22.03.2022 г.; (технические науки) с 15.02.2023 г.;
- 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки с 27.01.2021 г.);
- 2.1.5. Строительные материалы и изделия (технические науки с 27.01.2021 г.);
- 2.1.9. Строительная механика (технические науки с 15.11.2021 г.)

Сетевое издание включено в базы данных: РИНЦ eLIBRARY.ru, КиберЛенинка.



©2026 Контент доступен по лицензии CC BY-NC 4.0
This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Редакционный совет:

ПЕТРОВ Владилен Васильевич – председатель редакционного совета, академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
АКИМОВ Павел Алексеевич – академик РААСН, профессор, доктор технических наук, ректор Московского государственного строительного университета
АХМЕДОВА Елена Александровна – академик РААСН, доктор архитектуры, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, заведующая кафедрой «Градостроительство», Самарский государственный технический университет
БЕККЕР Александр Тевьевич – академик РААСН, Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Политехнического института Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия)
БЕЛОСТОЦКИЙ Александр Михайлович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Московский государственный строительный университет
ГАДЖИЕВ Мухлис Ахмед оглы – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции», Азербайджанский университет архитектуры и строительства (Азербайджан, Баку)
ГЕЛЬФОНД Анна Лазаревна – академик РААСН, Заслуженный работник культуры РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор архитектуры, профессор, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович – академик РААСН, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, Московский государственный строительный университет
ЗЕМЛЯНУХИН Александр Исаевич – доктор физико-математических наук, профессор, проректор по науке и инновациям, Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
ИЛЬИЧЕВ Владислав Александрович – академик РААСН, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный строитель, доктор технических наук, профессор, вице-президент по направлению «Инновации», Российская академия архитектуры и строительных наук (Москва, РФ)
ИСАКУЛОВ Байзак Разакович – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Дизайн и строительства», «Баишев Университет» (Казахстан, Актобе)
КАПРИЕЛОВ Семен Суренович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Российская академия Архитектуры и строительных наук (Москва, Россия)
КОЗЛОВ Дмитрий Вячеславович – академик РААСН, профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой Гидравлики

и гидротехнического строительства НИУ МГСУ, академик-секретарь Отделения строительных наук РААСН (Москва, Россия)
ЛЯХОВИЧ Леонид Семенович – академик РААСН, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный строитель, доктор технических наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет
ЛЯЧЕНКОВ Николай Васильевич – лауреат Государственной премии Совета министров СССР, Почетный гражданин г.о. Тольятти, действительный член Российской Академии естественных наук, член-корреспондент Международной инженерной академии, доктор технических наук, профессор, эксперт, АНО ИСТЭ (Тольятти, Россия)
МАИЛЯН Левон Рафаэлович – академик РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог, Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Россия)
РИМШИН Владимир Иванович – член-корреспондент РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор, руководитель Института развития города Университета Минстроя (НИИСФ РААСН) (Москва, Россия)
СЕЛЯЕВ Владимир Павлович – академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ и РМ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (Саранск, Россия)
СКОЛУБОВИЧ Юрий Леонидович – академик РААСН, Заслуженный эколог РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор технических наук, профессор, ректор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Новосибирск, Россия)
СОРОЧАЙКИН Андрей Никонович – заместитель главного редактора, Почетный строитель, кандидат экономических наук, доктор философских наук; директор, профессор кафедры судебной экспертизы, АНО ИСТЭ (Тольятти, Россия)
ТРАВУШ Владимир Ильич – академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, Заслуженный строитель РФ, Лауреат Государственной премии РФ в области науки и технологий, Лауреат Премии Совета Министров СССР, дважды Лауреат Премии Правительства РФ, доктор технических наук, профессор, вице-президент, Российская академия архитектуры и строительных наук (Москва, Россия)
ТРЕЩЁВ Александр Анатольевич – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства, строительных материалов и конструкций, Тульский государственный университет
ХАРИТОНЧИК Сергей Васильевич – доктор технических наук, доцент, ректор Белорусского Национального технического университета (Республика Беларусь, Минск)

Адрес редакции: 445047 Самарская область, г. Тольятти, Южное шоссе, дом 35А, офис 401, e-mail: expert763@mail.ru; <http://expert763.ru>

Founder: Independent Noncommercial Organization "Institution of Forensic Construction and Technological Expertise" (INO "IFCTE"), **co-founders:** Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Anpilov S.M., Matveeva M.M., Sorochaikin I.A.

Published since 2019. Published 4 times a year.

Prefix DOI: 10.51608/26867818

The certificate of mass media registration **EL № ФС 77-83498** issued by Federal Service of Supervision of Communications, Information Technology and Mass Communications

The online edition is **listed on Higher Attestation Commission** within the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation as one of the leading peer-reviewed scientific journals and publications, in which the main results of the Ph.D. thesis in these scientific specialties are to be published:

- 1.1.8. Mechanics of a deformable solid body (physical and mathematical sciences since 22.03.2022; technical sciences since 15.02.2023);
- 2.1.1. Building structures, buildings and facilities (technical sciences since 27.01.2021);
- 2.1.5. Building materials and articles (technical sciences since 27.01.2021);
- 2.1.9. Structural mechanics (technical sciences since 15.11.2021).

The online edition is included Russian Science Citation Index (RSCI), CyberLeninka



©2026 Контент доступен по лицензии CC BY-NC 4.0

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license
(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Editorial Board:

Vladilen V. PETROV – Academician of RAACS, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Pavel A. AKIMOV – Academician of RAACS, Dr. of Technical, Prof., Rector of the Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

Elena A. AKHMEDOVA – Academician of RAACS, Dr. of Architecture, Prof., Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Head of the Department of Urban Planning, Samara State Technical University (Samara, Russia)

Alexander T. BEKKER – Academician of RAACS, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Scientific Director of the Polytechnic Institute of the Far Eastern Federal University (Vladivostok, Russia)

Alexander M. BELOSTOTSKIY – Academician of RAACS, Dr. of Technical, Prof., Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

Mukhlis Ahmed oglu HAJIYEV – Dr. of Technical, Prof., Head of the Department "Building Structures", Azerbaijan University of Architecture and Construction (Baku, Azerbaijan)

Anna L. GELFOND – Academician of the RAACS, Honored Worker of Culture of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Dr. of Architecture, Prof., Nizhny Novgorod State University of Architecture and Civil Engineering (Nizhny Novgorod, Russia)

Vladimir T. EROFEEV – Academician of RAACS, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

Alexander I. ZEMLYANUKHIN – Doctor of Physics and Mathematics, Professor, Vice-Rector for Science and Innovation, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Vladislav A. ILYICHEV – Academician of the RAACS, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honorary Builder, Doctor of Technical Sciences, Professor, Vice President in the direction of "Innovation", Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russia)

Bayzak R. ISAKULOV – Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Design and Construction, Baishev University (Aktobe, Kazakhstan)

Semyon S. KAPRILOV – Academician of RAACS, Dr. of Technical, Prof., Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russia)

Dmitry V. KOZLOV – Academician of RAACS, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Hydraulics and Hydraulic Engineering

at the Moscow State University of Civil Engineering, Academician-Secretary of the Department of Construction Sciences of the RAACS (Moscow, Russia)

Leonid S. LYAKHOVICH – Academician of the RAACS, Honored Worker of Science and Technology of the Russian Federation, Honorary Builder, Doctor of Technical Sciences, Professor, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering

Nikolai V. LASCENCOV – Laureate of the state prize of the Council of Ministers of the USSR, Honorary citizen of Togliatti, Full Member of the Russian Academy of Natural Sciences, Corresponding Member of the International Engineering Academy, Dr. of Technical, Prof., expert, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Levon R. MAILYAN – Academician of RAACS, Honored Builder of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Prof. of the Department of Roads, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)

Vladimir I. RIMSHIN – Corresponding Member of RAACS, Honored Builder of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Head of the Institute of City Development of the University of Ministry (Moscow, Russia)

Vladimir P. SELYAEV – Academician of RAACS, Honored Worker of Science of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Building Structures, Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia)

Yuri L. SKOLUBOVICH – Academician of the RAACS, Honored Ecologist of the RF, Honorary Worker of Higher Professional Education of the RF, Dr. of Technical, Prof., Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Novosibirsk, Russia)

Andrey N. SOROCHAIKIN – Candidate of Economic, Dr. of Philosophy, Honorary Builder; Director, Professor of the Department of Forensic Examination, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Vladimir I. TRAVUSH – Academician of RAACS, Honored Scientist of the Russian Federation, Honored Builder of the Russian Federation, Laureate of the State Prize of the Russian Federation in the field of science and technology, Laureate of the Prize of the Council of Ministers of the USSR, twice Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Vice President, Russian Academy of Architecture and Construction Sciences (Moscow, Russia)

Alexander A. TRESCHEV – Corresponding Member of the RAACS, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Construction, Building Materials and Structures, Tula State University (Tula, Russia)

Sergey V. KHARITONCHIK – Dr. of Technical Sciences, Associate Professor, Rector of the Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk)

Editorial office: 445047, office 401, the house 35A, Southern Highway, Tolyatti, Samara region, e-mail: expert763@mail.ru; <http://expert763.ru>

Редакционная коллегия:

МУРАШКИН Василий Геннадьевич – главный редактор, доктор технических наук, доцент, АНО "ИССТЭ" (Тольятти, Россия)

АНПИЛОВ Сергей Михайлович – заместитель главного редактора, Заслуженный изобретатель РФ, советник РААСН, Почетный строитель, доктор технических наук, Почетный профессор НГАСУ (СИБСТРИН), ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных конструкций кафедры ЖБК, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН)

СОРОЧАЙКИН Андрей Никонович – заместитель главного редактора, Почетный строитель, кандидат экономических наук, доктор философских наук; директор, профессор кафедры судебной экспертизы АНО ИССТЭ (Тольятти, Россия)

МАТВЕЕВА Мария Михайловна – ответственный секретарь, кандидат педагогических наук, АНО "ИССТЭ" (Тольятти, Россия)

БОСАКОВ Сергей Викторович – доктор технических наук, профессор, кафедра "Математические методы в строительстве", Белорусский Национальный технический университет (Республика Беларусь, Минск)

ВАВРЕНЮК Светлана Викторовна – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, ФГБУ "ЦНИИП Минстроя России" (Владивосток, РФ)

ВЕДЯКОВ Иван Иванович – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, дважды лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники, директор ЦНИИ строительных конструкций им. В.А. Кучеренко АО «НИЦ „Строительство“» (Москва, Россия)

ВЛАСОВ Виктор Алексеевич – Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор физико-математических наук, профессор, советник РААСН, ректор, Томский государственный архитектурно-строительный университет

ГАРИБОВ Рафаил Баширович – доктор технических наук, профессор, советник РААСН, АНО "ИССТЭ" (Тольятти, Россия)

ГЛАГОЛЕВ Вадим Вадимович – доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой "Вычислительная механика и математика", Тульский государственный университет

ГЛУХОВ Вячеслав Сергеевич – Заслуженный строитель РФ, кандидат технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Пензенский государственный университет архитектуры и строительства

ГОРДОН Владимир Александрович – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, ведущий научный сотрудник, Орловский государственный университет им. И.С. Тургенева

ЕРЫШЕВ Валерий Алексеевич – советник РААСН, доктор технических наук, профессор кафедры "Промышленное и гражданское строительство", Тольяттинский государственный университет

ЖАДАНОВ Виктор Иванович – Заслуженный строитель РФ, советник РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций, Оренбургский государственный университет

ЗВЕРЕВ Виталий Валентинович – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой металлических конструкций, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Липецкий государственный технический университет

КОПАНИЦА Наталья Олеговна – профессор, доктор технических наук, заведующий кафедрой Строительных материалов и технологий Томского государственного архитектурно-строительного университета

КОРОБКО Андрей Викторович – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры Мехатроники, механики и робототехники, Орловский государственный университет им. Тургенева

КОРОБКО Виктор Иванович – доктор технических наук, профессор, кафедра "Строительные конструкции", Орловский государственный университет им. Тургенева

КОРОЛЬ Елена Анатольевна – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, Лауреат премии Правительства РФ в области науки и техники для молодых ученых, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Почетный строитель, заведующий кафедрой организации и реновации производства Московского государственного строительного университета

КОТЛОВ Виталий Геннадьевич – доктор технических наук, профессор, советник РААСН, проректор по воспитательной работе, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

ЛЕСОВИК Руслан Валерьевич – доктор технических наук, профессор, советник РААСН, проректор по международной деятельности, Белгородский государственный университет им. В.Г. Шухова

ЛЕОНовИЧ Сергей Николаевич – иностранный член РААСН, доктор технических наук, профессор, кафедра "Строительные материалы и технология строительства", декан строительного факультета, Белорусский Национальный технический университет (Республика Беларусь, Минск)

МАРКИН Алексей Александрович – доктор физико-математических наук, профессор, кафедра "Вычислительная механика и математика", Тульский государственный университет

МЕДВЕДЕВ Валентин Григорьевич – доктор юридических наук, доцент, профессор кафедры Теории и истории государства и права, Тольяттинский государственный университет

МИРСАЯПОВ Илизар Талгатович – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Казань, РФ)

МИРСАЯПОВ Илшат Талгатович – доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Казань, РФ)

МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, доцент, директор института архитектуры, строительства и транспорта, Тамбовский государственный технический университет

НИЗИНА Татьяна Анатольевна – советник РААСН, доктор технических наук, профессор, директор Института архитектуры и строительства, Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва (Саранск, Россия)

НИЧКАСОВ Анатолий Иванович – иностранный член РААСН, Заслуженный строитель Республики Беларусь, Председатель Союза строителей Республики Беларусь (Республика Беларусь, Минск)

ОВЧИННИКОВ Игорь Георгиевич – Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор кафедры «Транспортное строительство», Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А. / Пермский национальный исследовательский политехнический университет

ПИЧУГИН Анатолий Петрович – доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник, Новосибирский государственный аграрный университет (Россия, Новосибирск)

ПОТАПОВ Александр Николаевич – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, Южно-Уральский государственный университет (Челябинск, Россия)

РАХИМОВ Равиль Зуфарович – член-корреспондент РААСН, Заслуженный деятель науки РФ и РТ, Почетный строитель, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Лауреат Премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, Лауреат Государственной премии по науке и технике РТ, доктор технических наук, профессор, советник ректора, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Казань, РФ)

САЛИЕВА Роза Наилюевна – доктор юридических наук, профессор, заведующий лабораторией правовых проблем недропользования, экологии и топливно-энергетического комплекса, Академия наук Республики Татарстан

СОКОЛОВ Борис Сергеевич – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки и техники РТ, Лауреат госпремии РТ, научный консультант АО "Казанский Гипрониавиапром"

СОЛЮАНОВ Юрий Иванович – доктор технических наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж» (Москва)

СТРОКОВА Валерия Валерьевна – член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор, профессор РАН, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный работник высшей школы РФ, директор инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов, заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов, Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

СУЛЕЙМАНОВ Альфред Мидхатович – доктор технических наук, профессор, проректор по науке и инновациям, Казанский государственный архитектурно-строительный университет (Казань, Россия)

ХОЗИН Вадим Григорьевич – Заслуженный деятель науки РФ и РТ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой "Технология строительных материалов, изделий и конструкций", Казанский государственный архитектурно-строительный университет

ХРИСТИЧ Дмитрий Викторович – доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры "Вычислительная механика и математика", Тульский государственный университет

ХРИТАНКОВ Владимир Фёдорович – доктор технических наук, профессор; Новосибирский государственный аграрный университет

ШЕСТАКОВ Александр Алексеевич – доктор философских наук, профессор, заведующий кафедрой "Философия и социально-гуманитарные науки", Самарский государственный технический университет

Editorial Staff:

Vasily G. MURASHKIN – Editor-in-Chief, Dr. of Technical, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Sergey M. ANPILOV – Deputy Editor-in-Chief, Honored Inventor of the Russian Federation, Advisor to RAACS, Honorary Builder, Dr. of Technical, Honorary Professor of SIBSTRIN, Leading Researcher at the Testing Center for Building Structures at the Department of Concrete Structures of Novosibirsk State Architectural and Construction University

Andrey N. SOROCHAIKIN – Deputy Editor-in-Chief, Candidate of Economic, Dr. of Philosophy, Honorary Builder; Director, Professor of the Department of Forensic Examination, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Maria M. MATVEEVA – Executive Secretary, Candidate of Pedagogical Sciences, ANO "IFCTE" (Togliatti, Russia)

Sergey V. BOSAKOV – Dr. of Technical Sciences, Prof., Department of Mathematical Methods in Construction, Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk)

Svetlana V. VAVRENYUK – Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical Sciences, Prof., CIRI of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Vladivostok, RF)

Ivan I. VEDYAKOV – Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof., twice Laureate of the RF Government Prize in the Field of Science and Technology, Director of the Central Research Institute of Building Structures named after V.A. Kucherenko JSC "Research Center" Construction " (Moscow, Russia)

Viktor A. VLASOV – Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor, Advisor to the RAACS, Rector, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering

Rafail B. GARIBOV – Dr. of Technical, Prof., Advisor to RAACS, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Vadim V. GLAGOLEV – Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Prof., Head of the Department of Computational Mechanics and Mathematics, Tula State University (Tula, Russia)

Vyacheslav S. GLUKHOV – Honored Builder of the Russian Federation, Candidate of Technical Sciences, Prof., Head of the Department, Penza State University of Architecture and Civil Engineering (Penza, Russia)

Vladimir A. GORDON – Advisor to the RAACS, Dr. of Technical, Prof., Leading Researcher, Oryol State University named after Turgenev (Oryol, Russia)

Valery A. ERYSHV – Dr. of Technical, Advisor to RAACS, Prof. of the Department of Industrial and Civil Construction, Togliatti State University (Tolyatti, Russia)

Victor I. ZHADANOV – Honored Builder of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Building Structures, Orenburg state University (Orenburg, Russia)

Vitaly V. ZVEREV – Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical Sciences, Prof., Head of the Department of Metal Structures, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Lipetsk State Technical University (Lipetsk, Russia)

Natalia O. KOPANITSA – Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Building Materials and Technologies, Tomsk State University of Architecture and Civil Engineering (Tomsk, Russia)

Andrey V. KOROBKO – Dr. of Technical, Prof., Prof. of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics, Oryol State University named after Turgenev (Oryol, Russia)

Viktor I. KOROBKO – Dr. of Technical, Prof., Department of Building Structures, Oryol State University named after Turgenev (Oryol, Russia)

Elena A. KOROL – Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof., Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation in the field of science and technology for young scientists, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honorary Builder, Head of the Department of Organization and Renovation of Production, Moscow State University Of Civil Engineering (National Research University)

Vitaly G. KOTLOV – Dr. of Technical, Prof., Vice-rector for Educational Work, Volga State Technological University (Yoshkar-Ola, Russia)

Ruslan V. LESOVIK – Doctor of Technical Sciences, Professor, Advisor to the RAACS, Vice-Rector for International Affairs, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov

Sergei N. LEONOVICH – Foreign Member of the RAACS, Dr. of Technical, Prof., Department of Building Materials and Construction Technology, Dean of the Faculty of Civil Engineering, Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk)

Aleksey A. MARKIN – Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Prof., Department of Computational Mechanics and Mathematics, Tula State University (Tula, Russia)

Valentin Gr. MEDVEDEV – Dr. of Law, Associate Professor, Prof. of the Department of Theory and History of State and Law, Togliatti State University (Togliatti, Russia)

Ilizar T. MIRSAYAPOV – Corresponding Member of the RAACS, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, RF)

Ilshat T. MIRSAYAPOV – Dr. of Technical, Associate Prof., Head of the Department, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, RF)

Pavel V. MONASTYREV – Corresponding Member of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Architecture, Construction and Transport, Tambov State Technical University

Tatyana A. NIZINA – Dr. of Technical, Advisor to RAACS, Prof., Director of the Institute of Architecture and Construction, Mordovian State University named after N. P. Ogarev (Saransk, Russia)

Anatoly I. NICHKASOV – Foreign Member of the RAACS, Honored Builder of the Republic of Belarus, Chairman of the Union of Builders of the Republic of Belarus (Republic of Belarus, Minsk)

Igor G. OVCHINNIKOV – Honored Scientist of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Transport Construction, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov (Saratov, Russia)

Anatoly P. PICHUGIN – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Scientific Officer, Novosibirsk State Agrarian University (Russia, Novosibirsk)

Alexander N. POTAPOV – Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof., South Ural State University (Chelyabinsk, Russia)

Ravil Z. RAKHIMOV – Corresponding Member of RAACS, Honored Worker of the Russian Federation and the Republic of Tatarstan, Honorary Builder, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation in the field of science and technology, Laureate of the State Prize for Science and Technology of the Republic of Tatarstan, Dr. of Technical, Prof., adviser to the rector, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, RF)

Roza N. SALIEVA – Dr. of Law, Prof., Head of the Laboratory of Legal Problems of Subsoil Use, Ecology and Fuel and Energy Complex, Academy of Sciences of the Republic of Tatarstan (Kazan, Russia)

Boris S. SOKOLOV – Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof. (Kazan, Russia)

Yury I. SOLUYANOV – Dr. of Technical, Prof., Kazan State Power Engineering University, President of the Roselectromontazh Association (Moscow)

Valeria V. STROKOVA – Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof., Professor at the Russian Academy of Sciences, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation, Director of the Innovative Research and Experimental Industrial Center for Nanostructured Composite Materials, Head of the Department of Materials Science and Technology, Belgorod State Technological University named after V.G. Shoukhov

Alfred M. SULEIMANOV – Dr. of Technical, Prof., Vice-Rector for Science and Innovation, Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, Russia)

Vadim G. KHOZIN – Honored Worker of Science of the Russian Federation and the Republic of Tatarstan, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department "Technology of Building Materials, Products and Structures", Kazan State University of Architecture and Civil Engineering (Kazan, Russia)

Dmitry V. KHRISTICH – Dr. of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor, Prof. of the Department of Computational Mechanics and Mathematics, State University (Tula, Russia)

Vladimir F. KHRITANKOV – Doctor of Technical Sciences, Professor; Novosibirsk State Agrarian University (Novosibirsk, Russia)

Alexander A. SHESTAKOV – Dr. of Philosophy, Prof., Head of the Department of Philosophy and Social Sciences and Humanities, Samara State Technical University (Samara, Russia)

СОДЕРЖАНИЕ

ПЕРСОНАЛИИ

Поздравляем с 90-летним юбилеем академика РААСН В.И. ТРАВУША	10
Поздравляем академика В.И. ТРАВУША с 90-летним юбилеем СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, Низина Татьяна Анатольевна.....	14
Ода Травушу Владимиру Ильичу академику и вице-президенту Российской Академии архитектуры и строительных наук (РААСН), доктору технических наук, профессору, Заслуженному деятелю науки Российской Федерации в честь девяностолетия ПИЧУГИН Анатолий Петрович	16
НЕ КАЖДОМУ ДАНО ТАК ЩЕДРО ЖИТЬ... ПЕТРОВ Владилен Васильевич, АНПИЛОВ Сергей Михайлович	22
Поздравляем академика А.Т. БЕККЕРА с 80-летним юбилеем	46
Поздравляем Д.В. КОЗЛОВА с избранием академиком РААСН	49
Поздравляем Ю.Л. СКОЛУБОВИЧА с избранием академиком РААСН	51
Поздравляем В.В. СТРОКОВУ с избранием членом-корреспондентом РААСН	53
Поздравляем С.М. Анпилова с присвоением звания «Почетный профессор НГАСУ (СИБСТРИН)»	55

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

ПОВЕДЕНИЕ БЕСКОНЕЧНОЙ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ ИЗ ПОЛИМЕРБЕТОНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ БАРКОВСКАЯ Светлана Владимировна, ПРОХОРОВА Алла Валерьевна.....	57
УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ БЕДОВ Анатолий Иванович, ЛАСЬКОВ Николай Николаевич, ГАБИТОВ Азат Исмагилович, НЕДОСЕКО Игорь Вадимович, САЛОВ Александр Сергеевич.....	61
ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АРМИРОВАННЫХ БАЗАЛЬТОВЫМ ВОЛОКНОМ БЕТОННЫХ ПЛИТ БУЛГАКОВ Алексей Григорьевич, СЕРГЕЕВА Ирина Владимировна, АСЕЕВ Вячеслав Юрьевич, ШУБИН Игорь Любимович, ХОЛЬШЕМАХЕР Клаус, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, ТАРАКАНОВ Олег Вячеславович.....	69
ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СБОРНЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С БАЗАЛЬТОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ БУЛГАКОВ Алексей Григорьевич, СЕРГЕЕВА Ирина Владимировна, АСЕЕВ Вячеслав Юрьевич, ТАРАКАНОВ Олег Вячеславович, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, ШУБИН Игорь Любимович.....	81
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ ЗВЕРЕВ Виталий Валентинович, РИМШИН Владимир Иванович, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, ЖИДКОВ Константин Евгеньевич, МАРКОВИЧ Александр Живорданович.....	89
РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗО-СЕРНИСТЫХ ОТХОДОВ ИСАКУЛОВ Баизак Разакович, ИЛЪЯСОВ Алланазар Тореханович, ТУРГАЕВ Жамбыл Адилбаевич, ИСАКУЛОВ Абилхаир Байзакович, ДЖУМАБАЕВА Камар Муратовна	97

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛИ 10ХСНД-2 В СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ МЕРКУЛОВ Сергей Иванович, ПРИКАЗЧИКОВА Марина Максимовна, ЛЕВЕНЕЦ Роман Юрьевич, ЕСИПОВ Станислав Максимович	106
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ НИКОЛЮКИН Алексей Николаевич, АНТОНОВ Василий Михайлович, МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович, ЛИСОВСКИЙ Владислав Александрович	113
МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ СЦЕПЛЕНИЯ КОРРОДИРОВАННОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ НИКОЛЮКИН Алексей Николаевич, ХУДЯКОВ Александр Владимирович, МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович, МАМОНТОВ Андрей Александрович, БУЛАНОВА Виктория Александровна	124
АНАЛИЗ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВДОЛЬ И ПОПЕРЕК ВОЛОКОН СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, АРХИПОВ Игорь Владимирович, ЛАЗАРЕВ Александр Львович	132
ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНО-РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ СМИРНОВА Ольга Евгеньевна	138
ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА И ОЦЕНКА СТРУКТУРООБРАЗУЮЩЕЙ РОЛИ ПОРИСТОСТИ КОМПОЗИТА ЧЕРКАСОВ Василий Дмитриевич, ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Иванович	144
ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УКРЕПЛЕННЫХ ЦЕМЕНТНО-ВОДНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ ГРУНТОВЫХ ОТСОСОВ С ДОБАВКАМИ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ ЧЕСНОКОВ Роман Александрович, ПИЧУГИН Анатолий Петрович	150
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ РЕАЛЬНОГО ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ШКИЛЬНЮК Максим Александрович	155

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

УЧЕТ СДВИГОВЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ РАСЧЕТАХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК И РАМ ВАРИАЦИОННО-РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ БОСАКОВ Сергей Викторович, КОЗУНОВА Оксана Васильевна	160
ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРМ, РЕГУЛИРУЕМОГО СПОСОБОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ДЛИН ЭЛЕМЕНТОВ СЕБЕШЕВ Владимир Григорьевич, ЗЕЛЕНЕЦКИЙ Сергей Александрович	165

РЕЦЕНЗИИ

ОТЗЫВ НА УЧЕБНИК «ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ» ТЕЛИЧЕНКО Валерий Иванович	171
<i>Условия размещения материалов</i>	173

CONTENT

PERSONALITIES

CONGRATULATIONS ON THE 90-YEAR ANNIVERSARY TO THE ACADEMICIAN OF RAACS V.I. TRAVUSH	10
CONGRATULATIONS ON THE 90-YEAR ANNIVERSARY TO THE ACADEMICIAN V.I. TRAVUSH SELYAEV Vladimir Pavlovich, NIZINA Tatiana Anatolyevna.....	14
ODE TO TRAVUSH VLADIMIR ILYICH ACADEMICIAN AND VICE-PRESIDENT OF THE RUSSIAN ACADEMY OF ARCHITECTURE AND CONSTRUCTION SCIENCES, DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES, PROFESSOR, HONORED WORKER OF SCIENCE OF THE RUSSIAN FEDERATION IN HONOR OF HIS NINETIETH BIRTHDAY PICHUGIN Anatoly Petrovich.....	16
NOT EVERYONE CAN LIVE SO GENEROUSLY... PETROV Vladilen Vasilievich, ANPILOV Sergey Mikhailovich.....	22
CONGRATULATIONS ON THE 80-YEAR ANNIVERSARY TO THE ACADEMICIAN A.T. BEKKER	46
CONGRATULATIONS TO D. V. KOZLOV ON HIS ELECTION AS THE ACADEMICIAN OF RAACS.....	49
CONGRATULATIONS TO YU. L. SKOLUBOVICH ON HIS ELECTION AS THE ACADEMICIAN OF RAACS	51
CONGRATULATIONS TO V. V. STROKOVA ON THE ELECTION AS THE CORRESPONDENT MEMBER OF RAACS	53
CONGRATULATIONS TO S.M. ANPILOV ON CONFERRING THE TITLE OF «HONORARY PROFESSOR OF NSUACE (SIBSTRIN)».....	55

TECHNICAL SCIENCES. BUILDING AND ARCHITECTURE

BEHAVIOR OF ENDLESS THICK-WALLED POLYMER CONCRETE PIPE CONSIDERING THE CHANGE OF MATERIAL PROPERTIES UNDER ACTION OF AGGRESSIVE ENVIRONMENT BARCOVSKAY Svetlana Vladimirovna, PROKHOROVA Alla Valerievna.....	57
STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN USE BEDOV Anatoly Ivanovich, LASKOV Nikolay Nikolaevich, GABITOV AzatIsmagilovich, NEDOSEKO Igor Vadimovich, SALOV Alexander Sergeevich.....	61
CHOOSING THE OPTIMAL OPTION FOR RECONSTRUCTING BUILDINGS USING BASALT FIBER-REINFORCED CONCRETE SLABS BULGAKOV Alexey Grigorievich, SERGEEVA Irina Vladimirovna, ASEEV Vyacheslav Yurievich, SHUBIN Igor Lyubimovich, HOLSCHEMACHER Klaus, ANPILOV Sergey Mikhailovich, TARAKANOV Oleg Vyacheslavovich	69
FEATURES OF THE PRODUCTION OF PRECAST CONCRETE STRUCTURES WITH BASALT REINFORCEMENT BULGAKOV Alexey Grigorievich, SERGEEVA Irina Vladimirovna, ASEEV Vyacheslav Yurievich, TARAKANOV Oleg Vyacheslavovich, ANPILOV Sergey Mikhailovich, SHUBIN Igor Lyubimovich	81
EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF STEEL-REINFORCED CONCRETE SLABS WITH EXTERNAL REINFORCEMENT ZVEREV Vitaly Valentinovich, RIMSHIN Vladimir Ivanovich, ANPILOV Sergey Mikhailovich, ZHIDKOV Konstantin Evgenievich, MARKOVICH Alexander Zhivoradovich	89
DEVELOPMENT OF EFFECTIVE CONSTRUCTION MATERIALS BASED ON IRON-SULFIDE WASTE ISAKULOV Baizak Razakovich, ILYASOV Allanazar Torekhanovich, TURGAYEV Zhambyl Adilbaevich, ISAKULOV Abilkhaer Baizakovich, DZHUMABAeva Kamar Muratovna	97

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE WELDABILITY OF 10XCND-2 STEEL IN BUTT JOINTS OF BRIDGE STRUCTURES MERKULOV Sergey Ivanovich, LEVENETS Roman Yurievich, PRIKAZCHIKOVA Marina Maksimovna, ESIPOV Stanislav Maksimovich	106
USING NEURAL NETWORK MODELING TO DETERMINE THE CARRYING CAPACITY OF PUNCHED PILES NIKOLYUKIN Alexey Nikolaevich, ANTONOV Vasily Mikhaylovich, MONASTYREV Pavel Vladislavovich, LISOVSKY Vladislav Aleksandrovich	113
MECHANISMS OF DEGRADATION AND CALCULATION MODELS FOR THE BOND BETWEEN CORRODED REINFORCEMENT AND CONCRETE NIKOLYUKIN Alexey Nikolaevich, KHUDYAKOV Alexander Vladimirovich, MONASTYREV Pavel Vladislavovich, MAMONTOV Andrey Aleksandrovich, BULANOVA Victoria Alexandrovna.....	124
ANALYSIS OF DIAGRAMS OF WOOD DEFORMATION DURING LOADING ALONG AND ACROSS THE FIBERS SELYAEV Vladimir Pavlovich, ARKHIPOV Igor Vladimirovich, LAZAREV Alexander Lvovich.....	132
RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF WOODY PLANT RAW MATERIALS SMIRNOVA Olga Evgenievna.....	138
THE STRUCTURE STUDY OF A NON-AUTOCLAVED FOAM-CONCRETE AND EVALUATION OF THE STRUCTURALLY SHAPING ROLE OF COMPOSITE TOLERANCE CHERKASOV Vasily Dmitrievich, YEMELYANOV Alexey Ivanovich	144
DEFORMATION CHARACTERISTICS OF GROUND BANKS FORTIFIED WITH CEMENT-WATER COMPOSITION AND DIRECTED ADDITIVES CHESNOKOV Roman Aleksandrovich, PICHUGIN Anatoly Petrovich	150
FORECASTING THE REDUCTION OF THERMAL RESISTANCE IN MULTI-LAYER CLADDING STRUCTURES CONSIDERING REAL TEMPERATURE-HUMIDITY REGIME AND TECHNICAL CONDITION SHKILNIUK Maxim Alexandrovich	155

MECHANICS OF A DEFORMABLE SOLID BODY

ACCOUNTING FOR SHEAR AND LONGITUDINAL DEFORMATIONS IN NONLINEAR CALCULATIONS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS AND FRAMES USING THE VARIATION-DIFFERENCE METHOD BOSAKOV Sergey Viktorovich, KOZUNOVA Oksana Vasilyevna.....	160
OPTIMIZING THE STRESS STATE OF TRUSSES REGULATED BY VARIING THE INITIAL LENGTHS OF THE ELEMENTS SEBESHEV Vladimir Grigor'evich, ZELENETSKY Sergey Alexandrovich.....	165

REVIEWS

REVIEW ON THE TEXTBOOK «ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONSTRUCTION AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES» TELICHENKO Valery Ivanovich.....	171
<i>Conditions for posting materials</i>	173

ПЕРСОНАЛИИ

ПОЗДРАВЛЯЕМ С 90-ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ АКАДЕМИКА РААСН В.И. ТРАВУША



4 мая 2026 г. исполнилось 90 лет выдающемуся ученому, вице-президенту РААСН, профессору, доктору технических наук, главному конструктору и заместителю генерального директора ЗАО «Горпроект», Заслуженному деятелю науки РФ, Заслуженному строителю РФ, Почетному строителю России, лауреату Премии Совета Министров СССР, лауреату Государственной премии РФ, трижды лауреату Премии Правительства Российской Федерации, члену редакционного совета сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика».

Владимир Ильич Травуш – выдающийся конструктор и ученый, автор более 350 научных трудов, патентов, нормативных документов по строительным конструкциям, зданиям и сооружениям, автор, соавтор или генеральный конструктор более 70 реализованных проектов общественных зданий, сооружений и уникальных объектов.

Ещё в 60-е годы прошлого столетия именно В.И. Травуш со своим учителем Н.В. Никитиным спроектировали по заказу японской компании здание высотой 4 километра вместимостью до 500 тысяч человек (башня Н.В. Никитина – В.И. Травуша 4000), опередив время на многие десятилетия. Трудно переоценить вклад Владимира Ильича в

развитие архитектурно-строительного комплекса и градостроительства нашей страны. Многие уникальные здания, которые были возведены при непосредственном участии, авторстве или научном сопровождении В.И. Травуша, стали символами советской и российской эпох. Так, например, Останкинская телевизионная башня, Центральное ядро и другие сооружения Московского международного делового центра «Москва-Сити», по сути, открыли новую страницу в истории мирового высотного строительства. С именем Владимира Ильича связаны проекты моста «Багратион»; Башня-2000; Башня «Миракс-плаза» в Москве; Крытого конькобежного центра в Крылатском; большепро-



*С поздравлениями – юбиляру, академику РААСН В.И. Травушу,
члены Редакционного совета сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика»,
академики РААСН Петров В.В., Акимов П.А.
Фото 2021, Москва, РААСН*

летных Дворцов спорта в Москве, Архангельске, Твери и Сочи; Музея Хо Ши Мина в Ханое; бизнес-центра «Москва-парк» в Астане; Большая ледовая арена для хоккея с шайбой и трасса для бобслея в Сочи; многофункционального общественно-делового комплекса «Лахта-центр» в Санкт-Петербурге и другие, открывших новую страницу в истории российского высотного строительства.

Выдающиеся системные результаты научных исследований В.И. Травуша обеспечили создание прорывных технологий мирового уровня в области уникального высотного строительства, в развитии

отечественной и мировой строительной науки. Научные результаты признаны реальным сектором экономики и государством. В.И. Травуш Лауреат многих премий, в том числе:

- Государственная премия Российской Федерации в области науки и технологий 2021 года за заслуги мирового уровня в уникальном высотном строительстве, обеспеченные системными достижениями учёного в развитии строительных наук и технологий в России.

- Премии Совета Министров СССР за Дворец спорта в Архангельске;



Персоналии

- трёх Премий Правительства РФ, в том числе за восстановление Останкинской телебашни;

- Премии имени И. А. Гришманова в области науки, техники и организации производства промышленности строительных материалов, конструкций и строительной индустрии и др.

Владимир Ильич обладатель государственных, ведомственных и профессиональных наград: ордена Трудового Красного Знамени; Большой медали РААСН; Золотой медали РААСН; Золотой медали Российской Академии Художеств и др.

Исключительный профессионализм и ответственное отношение к своему делу позволяют Владимиру Ильичу успешно справляться со сложнейшими инженерными задачами на высочайшем уровне.

В.И. Травуш – это редчайшее, и, наверное, неповторимое сочетание интеллигентности и твердости в отстаивании своих позиций, профессионализма высшей марки¹.

Желаем Владимиру Ильичу новых творческих успехов, крепкого здоровья, бодрости, успехов, удачи, благополучия, счастья, реализации намеченных целей и задач!

*Уважаемый Владимир Ильич!
Редакционный совет, редакционная коллегия
сетевого научно-практического издания
«Эксперт: теория и практика»
искренне поздравляют Вас с юбилеем,
желают Вам крепкого здоровья, благополучия
и активного творческого долголетия!*

¹ URL: https://mgsu.ru/news/Universitet/NIUMGSU_pozdravlyaetsyubileemVladimirallichaTravusha/



CONGRATULATIONS ON THE 90-YEAR ANNIVERSARY TO THE ACADEMICIAN OF RAACS V.I. TRAVUSH

On May 4, 2026, V.I. Travush turned 90 years. He is an outstanding scientist, vice president of RAACS, professor, doctor of technical sciences, chief constructor and deputy general director of the CJSC "Gorproject", Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honored Builder of the Russian Federation, Honorary Constructor of Russia, laureate of the award of the USSR Minister Council, laureate of the State Prize of the Russian Federation, three-time laureate of the Prize of the Government of the Russian Federation, member of the editorial board of the network scientific and practical publication "Expert: Theory and Practice".

Vladimir Ilyich Travush is the outstanding constructor and scientist, author of more than 350 scientific papers, patents, regulatory documents on construction structures, buildings and facilities, author, co-author or general constructor of more than 70 completed projects of public buildings and structures, unique objects.

*Dear Vladimir Ilyich!
Editorial board, editorial panel of the network
scientific and practical publication
"Expert: Theory and Practice"
sincerely congratulate you on your anniversary,
wish you strong health, well-being and active creative longevity!*

**ПОЗДРАВЛЯЕМ АКАДЕМИКА В.И. ТРАВУШУ с 90-ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ**

Уважаемый Владимир Ильич!

Примите самые теплые, сердечные поздравления с 90-летним Юбилеем!

Вас знают как многогранного ученого, инженера-конструктора, человека высокого профессионализма, опытного и компетентного руководителя. Значимая часть Вашей трудовой деятельности напрямую связана с Российской академией архитектуры и строительных наук, является примером активной жизненной позиции, самоотдачи и преданности выбранному научному направлению. В копилке Ваших достижений такие уникальные объекты, как Останкинская башня, Дворец Советов на Ленинских горах, Дворец спорта в Архангельске, Конькобежный центр в Крылатском, мост «Багратион», комплекс «Москва-Сити», Башня 2000, Дворец спорта «Большой» в Сочи, Бизнес-центр «Москва» в Астане, Храмовый комплекс в Салехарде, Башня штаб-квартиры Газпрома «Лахта центр» в Санкт Петербурге и многие другие.

Талант инженера-конструктора, исследователя, а также самоотверженный труд и организаторские способности позволили Вам достичь высоких вершин, стать доктором технических наук, профессором, академиком и вице-президентом Российской академии архитектуры и строительных наук. Активная научная и конструкторская деятельность, в том числе в должности вице-президента РААСН и главного конструктора ЗАО «Городской проектный институт жилых и общественных зданий», способствовала решению Вами множества уникальных задач, в

том числе в области автоматизированного мониторинга деформаций несущих конструкций и оснований зданий и сооружений; методов определения ветровых нагрузок на высотные здания и сооружения; норм и правил проектирования высотных зданий и сооружений; методов расчёта деревянных, железобетонных, сталежелезобетонных и стальных конструкций, в том числе конструкций на упругом основании.

Ваши достижения получили высокое государственное и общественное признание, неоднократно отмечены почетными званиями Российской Федерации, высокими государственными наградами – почётный строитель Москвы и России, заслуженный строитель РФ, заслуженный деятель науки РФ, лауреат Премии Совета министров СССР, трижды лауреат Премии правительства Российской Федерации в области науки и техники. Уверены, что Ваш творческий потенциал и верность призванию еще долгие годы будут служить укреплению строительной отрасли России.

В день Вашего юбилея желаем Вам, уважаемый Владимир Ильич, крепкого здоровья, благополучия, счастья и новых творческих успехов!

*С уважением,
академик РААСН Селяев Владимир Павлович,
советник РААСН Низина Татьяна Анатольевна
(ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский
Мордовский государственный университет
им. Н.П. Огарёва», г. Саранск)*



CONGRATULATIONS ON THE 90-YEAR ANNIVERSARY TO THE ACADEMICIAN V.I. TRAVUSH

Dear Vladimir Ilyich!

Please accept our warmest, heartfelt congratulations on your 90th anniversary! You are known as a multi-dimensional scientist, structural engineer, highly professional person, an experienced and competent leader. The significant part of your work directly related to the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. It is an example of active life position, commitment and dedication to the chosen scientific direction.

The talent of the structural engineer, researcher, as well as dedication and organizational abilities allowed you to reach high peaks, become a doctor of technical sciences, professor, academician and vice president of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences. Active scientific and construction activities, including activities as the Vice-President of RAACS and the chief constructor of epy CJSC "Gorproject", have contributed to the solution of many unique tasks, including in the field of automated monitoring of deformations of load structures and foundations of buildings and facilities; methods for determining wind loads on tall buildings and structures; norms and rules for designing tall buildings and structures; methods for calculating wooden, reinforced concrete, steel-reinforced concrete and steel structures, including those with a resilient base.

Your achievements have received high state and public recognition, repeatedly marked with honorary titles of the Russian Federation.

On the day of your anniversary, we wish you, dear Vladimir Ilyich, strong health, well-being, happiness and new creative success!

*Sincerely,
Academician of the RAACS Selyaev Vladimir Pavlovich,
Advisor of the RAACS Nizina Tatyana Anatolyevna
(National Research Mordovian State University
named after N.P. Ogarev, Saransk)*



ОДА
ТРАВУШУ Владимиру Ильичу
академику и вице-президенту Российской академии архитектуры и строительных наук (РААСН),
доктору технических наук, профессору,
Заслуженному деятелю науки Российской Федерации
в честь девяностолетия

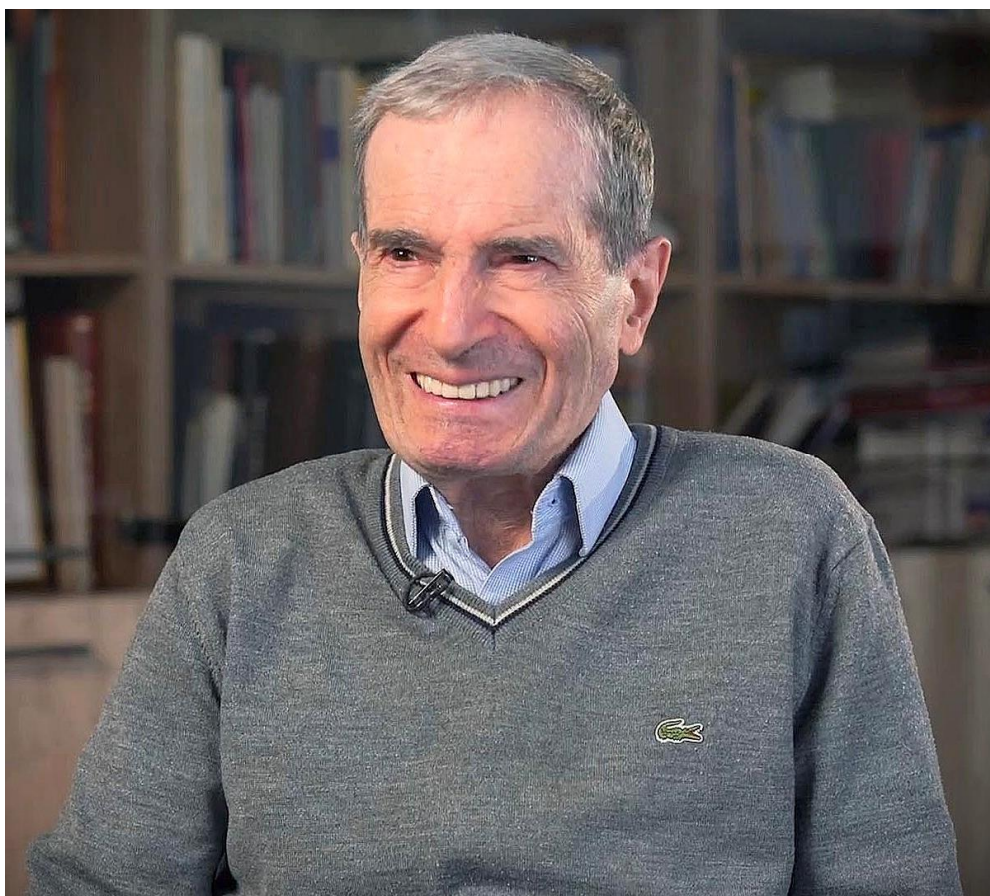
© Автор, 2026
SPIN: 6626-3274

ПИЧУГИН Анатолий Петрович
доктор технических наук, профессор,
Заслуженный работник высшей школы РФ
Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологии
(Россия, Новосибирск, e-mail: gmunsau@mail.ru)

ODE
to TRAVUSH Vladimir Ilyich
Academician and Vice-President of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences,
Doctor of Technical Sciences, Professor, Honored Worker of Science of the Russian Federation
in honor of his ninetieth birthday

© The Author(s) 2026

PICHUGIN Anatoly Petrovich
Doctor of Sciences (Technical), Professor
Siberian State University of Engineering and Biotechnology
(Russia, Novosibirsk)



В.И. Травуш

Фото из открытых источников: <https://историяотпервоголица.рф/authors/author.php?id=812>



Фото из открытых источников:
г. Днепропетровск–1940, Проспект Карла Маркса

Родился ты, как большинство в Союзе,
В красивом граде, что был на Днепре...
И был ещё мальчонкой, карапузом,
Как началась война на всей земле...

Как разрывались адские снаряды,
Как танки шли, кровавый след неся;
Карательно-фашистские отряды
Сжигали всё, лишь горе принося...



Фото 2017, дом семьи Травуша В.И. в г. Оренбург, переулок Мастерской, дом 4



Персоналии



Фото из открытых источников: г. Чкалов–1940,
улица Советская

Так вот с семьёй осел ты в Оренбурге –
Он принял на года, что шла война...
И детство проходило там не бурно –
Вкусили беды всей семьёй сполна...

А Оренбург простой был город малый...
И «Чкалов» назывался он тогда -
Заводы отвозили за Уралом,
С тех мест, к которым двигалась война...

И суета творилась в этом граде
От дел, чем обозначены в тылу...
Лишь корка хлеба всем была наградой,
А летом налегали на траву...



Фото 2017, дом семьи Травуша В.И. в г. Оренбург, переулок Мастерской, дом 4



Но жизнь текла вся по своим законам
И вот окончен гитлеровцев ход...
Закончилась война и снова дома
Вы появились под обжитый свод...

А повзрослевши, за учёбу взялся –
С отличием учился десять лет!
И выбор сделан, будто бы поклялся,
Отстроить, что разрушено от бед...

Восстановить огромные потери,
Которые война нам принесла;
И сделать так, чтоб дом и отчий берег
Наполнен был весь радостью сполна...

И факультет был выбран самый модный –
Строительный, как и красивый ВУЗ;
И «Пэ-Гэ-Эс» давала путь просторный
На производстве иль в науке – «Туз»!

«ДИСИ» считался вуз авторитетный –
Преподавали чудо-мастера,



Фото из открытых источников:
г. Днепропетровск–1950-е, «ДИСИ»



Фото из открытых источников:
https://tatlin.ru/articles/mne_povezlo
г. Темиртау – 1960-е. На строительстве
металлургического комбината
(«Казахстанской Магнитки»)



Фото из открытых источников: г. Москва – 1967
Телевизионная башня в Останкино

Которые несли науки светлой
Для каждого студента на века!...

Так заложили к опыту желанье,
К расчетам, чтобы прочность подсчитать,
И чтоб была надёжность, как посланье
Для долгой жизни здания в веках!...

Учёбы годы пролетели быстро –
В студенчестве всегда летят года!
И вот уж инженер Владимир с искрой –
От мастера к прорабу – как всегда!...

Так в Темиртау и пошла карьера...
А город тот – «Железная гора» -
Действительно был молод беспримерно
И выдавал железо «на гора»...

Вот главным инженером даже в тресте
Стал Травуш, но всё было не к душе...
Не захотел сидеть на тёплом месте –
В аспирантуру двинул, как в «туше»...

И вновь учёба – сердцу в том отрада;
И кандидатом стал достойным в срок!
С Никитиным знакомство, как награда
За вовремя освоенный урок!...

Работа развернулась всем на диво –
Над Телебашней, что в семьсот аршин,
Которая наметилась красиво
Стоять в Москве, быть выше всех вершин!...

Но, чтобы появилась телебашня
Расчёты надо было совершить...
И в этом деле аспирант вчерашний
Смог многое с успехами решить!...

Так закрепилось за Володей «хобби» -
Сложнейшие расчёты все ваять!
И понеслись проекты, словно дробью –
Один другого лучше!... Не унять!...

За годы, что промчались безвозвратно -
Без хвастовства их сотни набралось:
В Союзе - все расчёты многократно;
В Париже и в Японии пришлось...

Останкинская башня рекордсменом
Была на долги годы на весь мир...
А «Лахта центр» чарующим примером
Конструкциям новейшим задал пир!



Персоналии



Фото из открытых источников:
г. Санкт Петербург – 2018 «Лакhta центр»

Оригинальный комплекс «Москва-Сити»
Всем доказал – в России мастера
Есть уровня высокого, коль «свиты»
«Гнездо» такое – сказку в жизнь творя!...

Заслуженный ты стал и Академик,
Почётный многократно, без прикрас!
Профессор, на науку, коль нацелен,
И голос твой звучит для всех – Указ!

И премии, и разные награды
Не обошли, конечно, стороной:
От Государства орден и медали;
От ведомств разных знаки – все с душой!...



г. Санкт Петербург – 2017
Стадион «Зенит»

И сфера твоей творческой работы
Расширена сейчас, как никогда:
Проектировщик ты большой и знатный,
Конструктор и... в строительстве звезда!

Конструкции высоток, экспертиза;
Проекты с обновленьем городов;
Бетоны для фундаментов – их низа...
Стояли, чтоб века без лишних слов...



Фото из открытых источников:
г. Москва Комплекс «Москва-Сити»

Всё это разработано умело
Под руководством тихого творца
И так реализовано им смело,
Что дух захватит даже удальца!

Ты методы новейшие освоил
И многие из них даже создал!
И уж внедрил, и, стало быть, построил;
Об этом всём - студентам рассказал...



Московский многофункциональный
музейно-выставочный центр «Провиантские склады»

Завидуют коллеги и студенты
Энергии твоей, да, и уму –
Ведь получил ты эти дивиденды
За труд и мысли умные к тому...



*Вручение Президентом России
В.В. Путиным Государственной премии за 2021 год
академику РААСН В.И. Травушу*

Желают все строители России
Здоровья, чтоб крепчало каждый день;
И радостных минут, коль ты «Миссия»,
И силы, чтоб гасили зависть, лень...

Чтоб новые полёты мысли снова
Друзей всех восхищали и врагов:
Мол, снова создал то, что всем обновя,
И это почерк Травуша – он смог!...

Не прекращай трудиться, трудоголик!
Дерзай, как прежде, много ещё лет!
Хоть твой полёт велик, ты как Соколик,
Всегда стремишься ввысь – там Солнца свет!...



Обзорная статья
УДК 69 + 001.32
DOI 10.51608/26867818_2026_2_22

НЕ КАЖДОМУ ДАНО ТАК ЩЕДРО ЖИТЬ...

© Авторы, 2026
SPIN: 2090-4982

ПЕТРОВ Владилен Васильевич
академик РААСН, доктор технических наук, профессор
Саратовский государственный технический университет им. Гагарина Ю.А.
(РФ, Саратов)

SPIN: 3971-7691

АНПИЛОВ Сергей Михайлович
Заслуженный изобретатель РФ, советник РААСН, д.т.н.,
Почетный профессор НГАСУ (СИБСТРИН), ведущий научный сотрудник
испытательного центра строительных конструкций кафедры ЖБК
НГАСУ (СИБСТРИН)
(Россия, Новосибирск)

Аннотация. В статье, посвященной творчеству лауреата Государственной премии РФ, премии Совета Министров СССР, трех премий Правительства РФ, доктора технических наук, профессора, академика РААСН В.И. Травуша – выдающегося инженера–конструктора, гениального ученого, исследователя – рассмотрены наиболее крупные его работы: проекты различных сооружений, важнейшие реализованные исследования под его руководством или с его участием, представлены биографические сведения, обзор результатов научно-исследовательской деятельности из публикаций юбиляра и открытых источников. Используются фрагменты интервью, высказываний конструктора, опубликованных на сайтах в сети интернет, в публикациях и различных источниках. Многие созданные с участием конструктора В.И. Травуша объекты стали воплощением идей развития типологии зданий, весьма актуальных и в наши дни.

Ключевые слова: Травуш Владимир Ильич; телевизионная башня; высотное строительство; творчество; конструктивные особенности; несущие конструкции; преднапряженный железобетон; стальные канаты; опыт эксплуатации

Для цитирования: Петров В.В., Анпилов С.М. Не каждому дано так щедро жить... // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 22-45. doi:10.51608/26867818_2026_2_22.

Review article

NOT EVERYONE CAN LIVE SO GENEROUSLY...

©The Author(s) 2026

PETROV Vladilen Vasilievich
Academician of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor
Yuri Gagarin Saratov State Technical University
(Russia, Saratov)

ANPILOV Sergey Mikhailovich
Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Honorary Professor
of SIBSTRIN, Leading Researcher at the Testing Center for Building Structures
at the Department of Concrete Structures
Novosibirsk State Architectural and Construction University
(Russia, Novosibirsk)

Abstract. The article is devoted to the V.I. Travush's work. He is the laureate of the State Prize of the Russian Federation, the Prize of the Council of Ministers of the USSR, three awards of the Government of the Russian Federation, doctor of technical sciences, professor, academician of RAACS– outstanding engineer, constructor, scientist, and researcher. The article discusses his most important works: projects of various buildings, major researches carried out under his supervision or with his participation, biographical information, an overview of the results of scientific research activities from the jubilee's publications and from open sources. The article includes interview fragments, statements of the constructor



posted on websites, in publications, and various sources. Many objects created with the participation of the constructor V.I. Travush became the embodiment of ideas for the development of building typology, which are very relevant today.

Keywords: Travush Vladimir Ilyich; television tower; high-rise construction; creativity; structural features; load-bearing structures; prestressed reinforced concrete; steel ropes; operating experience

For citation: Petrov V.V., Anpilov S.M. Not everyone can live so generously... // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 22-45. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_22.

*«Главное – чтоб люди наши знали,
что все мы можем делать сами».*

В.И. Травуш

Владимир Ильич Травуш принадлежит к тому поколению инженеров, чья профессиональная биография давно вышла за пределы личного успеха и стала частью истории отечественной строительной науки. В его судьбе соединились практическая школа большой стройки, фундаментальная инженерная наука, работа над уникальными сооружениями и многолетнее служение профессиональному сообществу.

Сегодня имя В.И. Травуша хорошо известно специалистам в области строительной механики, высотного строительства и проектирования уникальных сооружений. Академик Российской академии архитектуры и строительных наук, доктор технических наук, профессор, Заслуженный деятель науки Российской Федерации, Заслуженный строитель Российской Федерации, он занимает особое место среди тех, кто формировал современное понимание роли конструктора в архитектуре и строительстве. За этими званиями стоит не только официальное признание, но и редкая по продолжительности и насыщенности профессиональная жизнь.

Творческий путь Владимира Ильича охватывает несколько важных этапов развития отечественной инженерной школы. Он начинался с реальной строительной практики, продолжился в научной среде Москвы, был связан с работой над Останкинской телебашней, а позднее с крупнейшими высотными и уникальными объектами конца XX и начала XXI века [1–4].

В этом смысле его биография позволяет увидеть не только судьбу одного выдающегося инженера, но и изменение самой профессии: от послевоенной индустриализации и советских инженерных дерзаний до современных сверхсложных проектов, требующих расчётной точности, научного сопровождения и междисциплинарного мышления.

Но наш юбилар не замыкался в одной роли: он выступает как гениальный инженер-конструктор, исследователь, организатор научной работы, эксперт, педагог и участник формирования профессиональных решений государственного масштаба.

Его деятельность связана с проектированием, расчётным обоснованием, экспертизой и научно-

техническим сопровождением сооружений, которые стали заметными событиями в строительной истории страны.



Детство и годы войны. Владимир Ильич Травуш родился 4 мая 1936 года в Днепропетровске, в семье служащих. Его отец, Илья Ефимович, был финансистом, мать, Берта Самуиловна, работала швейей. В семье росли двое детей: Владимир и его сестра Элеонора. Первые годы жизни прошли в мирном довоенном городе, в доме на улице Короленко, где, по сохранившимся сведениям, семья жила дружно и спокойно [5]. Это спокойствие было нарушено войной. Летом 1941 года, как и для миллионов семей страны, привычный уклад жизни членов его семьи закончился. С первых дней Великой Отече-

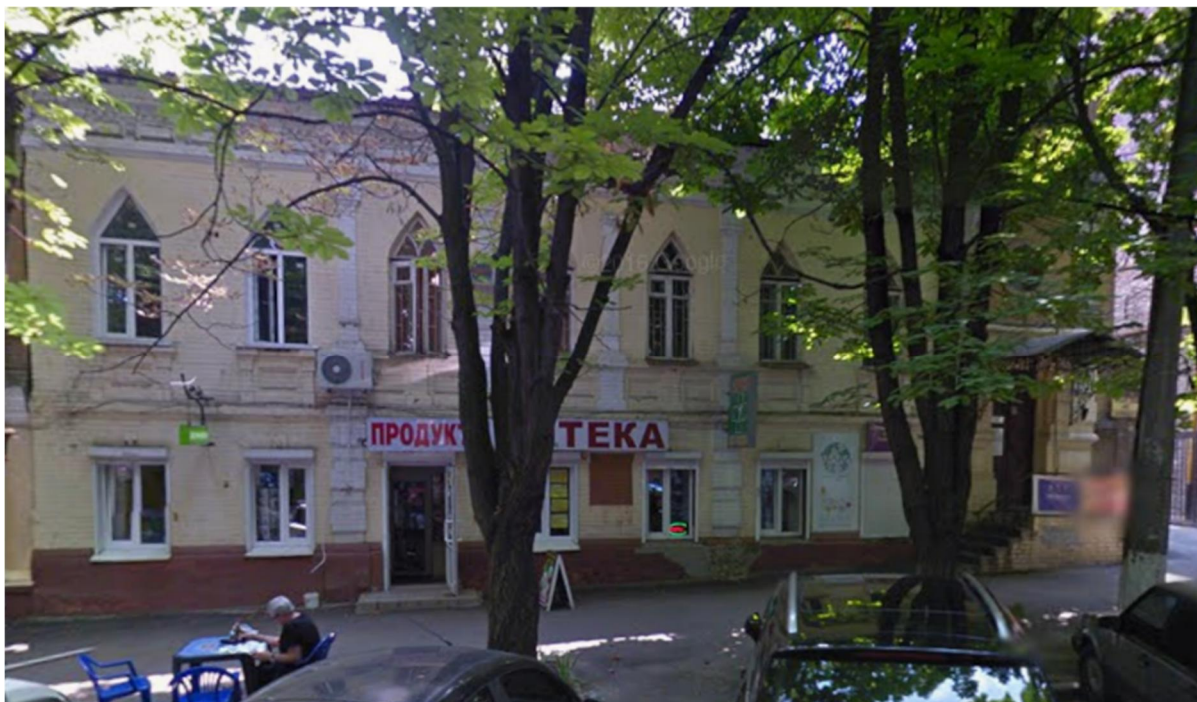


Фото от июля 2015 из открытых источников: дом 17 по ул. Короленко, г. Днепропетровск [5]

ственной войны семья была эвакуирована: сначала в Сталинград, затем в город Чкалов, нынешний Оренбург. Детство будущего инженера оказалось связано не только с родным городом, но и с дорогой эвакуации, тревогой военного времени, вынужденным ожиданием возвращения домой.

В октябре 1943 года войска 3-го Украинского фронта освободили Днепропетровск и Днепродзержинск. Весной 1944 года семья смогла вернуться на Днепр. Для Владимира это возвращение стало возвращением не только к дому, но и к учёбе: он поступил во второй класс 33-й мужской средней школы.

В этих ранних биографических обстоятельствах нет внешнего лоска, но есть важная внутренняя основа: поколение, к которому принадлежит Владимир Травуш, возросло в условиях, где основательность, труд, дисциплина и ответственность не были отвлечёнными словами. Они входили в жизнь рано и становились частью характера. Позднее эти качества проявятся уже в другой сфере: в инженерной профессии, где точность мысли и способность выдерживать персональную ответственность за принятые решения, становятся не менее важными, чем талант.

Окончив в 1953 году школу, Владимир Травуш поступил в Днепропетровский инженерно-строительный институт на факультет «Промышленное и гражданское строительство». Этот выбор определил не только направление будущей профессии, но и саму логику его дальнейшего пути: от понимания строительного дела в его практической основе к сложнейшим вопросам расчёта, проектирования и научного сопровождения уникальных сооружений.

Инженерно-строительное образование в те годы требовало не узкой специализации, а цельного профессионального взгляда. Будущий инженер должен был понимать конструкцию, материал, работу сооружения, организацию строительного процесса и ответственность проектного решения. Именно такая школа стала для Владимира Ильича первым фундаментом профессии.

В 1958 году он окончил институт с отличием. Этот факт важен не только как биографическая отметка. Он показывает раннюю собранность, трудолюбие и способность к системному освоению сложного материала.

Позднее эти качества проявятся уже в иной профессиональной среде: на большой стройке, в аспирантуре, в расчётной работе и в проектах, требующих от конструктора не только знания, но и внутренней дисциплины мышления.

Темиртау: школа строительной практики. После окончания института в 1958 году Владимир Травуш был направлен по распределению в город Темиртау Казахской ССР, на строительство Карагандинского металлургического комбината. Для молодого инженера это стало не просто первым местом работы, а настоящей школой большой стройки, где профессиональные знания сразу проверялись практикой. Темиртау конца 1950-х годов был одной из важных точек индустриального развития страны. Здесь строительство воспринималось не как отдельный объект, а как часть большого государственного дела. В такой среде инженер быстро понимал цену проектного решения, организационной точности и



ответственности за людей, сроки, материалы и результат.

За несколько лет Владимир Ильич прошёл путь от мастера и прораба до начальника участка, начальника производственно-технического управления и исполняющего обязанности главного инженера строительного управления. Такой рост был возможен только при сочетании профессиональной собранности, практической хватки и умения видеть строительный процесс не фрагментарно, а целиком.

Опыт Темиртау оказался важным для всей дальнейшей биографии Травуша. Здесь он получил то понимание стройки, которое невозможно заменить только расчётами и учебниками: знание реального строительного процесса, его напряжения, ограничений и человеческой стороны.

Позднее, работая уже над уникальными сооружениями, он будет соединять научную точность конструктора с опытом инженера, прошедшего школу практического строительства [14].

Москва: наука и профессиональная школа. В 1961 году в биографии Владимира Травуша начался новый этап. После нескольких лет работы на большой индустриальной стройке он поступил в аспирантуру Московского инженерно-строительного института имени В.В. Куйбышева на кафедру теоретической механики. Этот переход был закономерен: практический опыт требовал научного осмысления, а инженерная интуиция, сформированная на стройке, находила продолжение в расчёте, исследовании и теоретической работе.

Москва начала 1960-х годов стала для молодого инженера средой профессионального расширения. Здесь строительная практика соединялась с сильной научной школой, а вопросы прочности, устойчивости и работы конструкций рассматривались уже не только как производственные задачи, но и как предмет фундаментального исследования. Для Травуша это было время углубления в строительную механику, дисциплину, которая во многом определит его дальнейший профессиональный профиль.

Особое значение в этот период имела научная школа Бориса Григорьевича Коренева, одного из крупных специалистов в области строительной механики, динамики сооружений и расчёта конструкций на упругом основании [11]. Работа рядом с таким учёным давала не только методическую подготовку, но и определённую культуру инженерного мышления: точность постановки задачи, уважение к расчёту, внимание к поведению конструкции в реальных условиях.

В 1964 году Владимир Ильич окончил аспирантуру, а в 1966 году защитил кандидатскую диссертацию, посвящённую изгибу полубесконечных плит, лежащих на упругом основании [6]. Для читателя, далёкого от специальных расчётов, сама тема

может звучать узко и технически. Однако за ней стояла важная для строительства область: понимание взаимодействия конструкции с основанием, без которого невозможно надёжное проектирование сложных зданий и сооружений.

Этот научный этап стал для Травуша не отступлением от практики, а её продолжением на более глубоком уровне. Опыт реальной стройки сформировал у него чувство реального материала и строительного процесса, а аспирантура и исследовательская работа вооружили необходимым расчётным аппаратом. Именно это соединение практического и научного начал позднее станет одной из характерных особенностей его профессионального пути.

Останкино: встреча с большой инженерной задачей. Одним из ключевых поворотов в профессиональной биографии Владимира Травуша стала встреча с Николаем Васильевичем Никитиным, главным конструктором Останкинской телебашни [12]. Она произошла в 1964 году, вскоре после окончания аспирантуры, когда молодой инженер определял дальнейший путь и искал точку приложения своих знаний. Этот эпизод выглядит почти случайным, но именно такие встречи нередко становятся для профессиональной судьбы решающими: по рекомендации своего научного руководителя Бориса Григорьевича Коренева Владимир Травуш оказался в поле зрения Н.В. Никитина, которому в тот момент был нужен сотрудник для работы над проектом телебашни. Так молодой конструктор вошёл в авторский коллектив одного из самых смелых инженерных сооружений своего времени.

Для него это была не просто новая должность, а погружение в особую среду проектирования, где расчётная точность соединялась с ответственностью за объект государственного и символического значения.

Работа над таким сооружением требовала не только владения расчётными методами, но и способности понимать конструкцию как целое: её поведение, устойчивость, взаимодействие с внешними нагрузками и средой, требования эксплуатации и безопасности. В этой работе проявлялось то, что позднее станет одной из характерных черт его профессионального пути: соединение научной строгости с практическим пониманием большой строительной задачи.

В составе коллектива ЦНИИЭП зрелищных зданий и спортивных сооружений имени Б.С. Мезенцева В.И. Травуш работал над проектом телебашни до завершения её строительства и сдачи в эксплуатацию в 1967 году. Останкинская башня стала не только значительным инженерным достижением страны, но и важной вехой в его личной профессиональной биографии: после неё имя Травуша оказалось связано с кругом задач, где от конструктора тре-

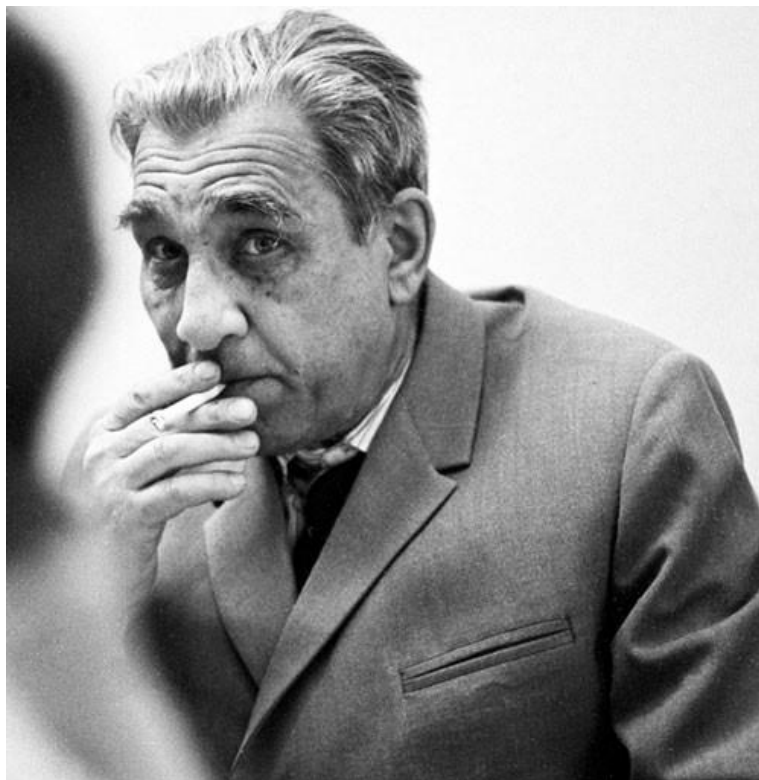


Фото из открытых источников: Николай Васильевич Никитин
(15.12.1907 – 03.03.1973)



Фото из открытых источников. Сотрудники отдела по проектированию Останкинской башни ЦНИИЭП им. Б.С. Мезенцева (слева-направо): Д. Дмитриев, В. Милошевский, А. Гоухберг, Ю. Климов, Н. Никитин, В. Травуш, Т. Пашкова, Э. Гофман, Н. Трусова, Г. Васильева, А. Юрин, за день до сдачи Останкинской телебашни в эксплуатацию 05.11.1967 г. [3]



бовались смелость, точность и готовность работать на пределе возможностей строительной науки.

Связь Владимира Ильича с Останкинской телебашней не завершилась после её открытия. В 1973 году он участвовал в проекте увеличения высоты башни, а после пожара 2000 года руководил проектом её восстановления. Это возвращение к объекту через десятилетия особенно показательно: сооружение, с которым начался его путь в мир уникального высотного строительства, вновь потребовало его опыта, расчётной культуры и профессиональной ответственности. Останкинская телебашня занимает особое место в биографии юбиляра: она стала для него не только первым великим объектом, но и своеобразной точкой отсчёта.

Через эту работу молодой инженер вошёл в профессиональное пространство, где каждое решение имеет долгую жизнь, а ответственность конструктора измеряется не только чертежом или расчётом, но и судьбой сооружения, ставшего частью образа страны.

Научная зрелость и большие проекты. Работа над Останкинской телебашней стала для Владимира Ильича Травуша важнейшей профессиональной школой, но не замкнула его биографию вокруг одного, пусть и выдающегося, сооружения. Напротив, именно после этого опыта постепенно складывается образ инженера и учёного, способного работать с задачами всё более высокого уровня сложности: от расчёта отдельных конструктивных систем до научного сопровождения крупнейших градостроительных и высотных проектов.

В 1977 году В.И. Травуш защитил докторскую диссертацию, посвящённую расчёту строительных конструкций на деформируемом основании [7]. Эта тема продолжала научную линию, начатую ещё в кандидатской работе, но уже выводила её на новый уровень обобщения. Для строительной науки подобные исследования имеют принципиальное значение: они связаны с пониманием того, как сооружение взаимодействует с основанием, как распределяются усилия, как обеспечивается надёжность объекта в реальных условиях эксплуатации. В дальнейшем именно эта область знаний станет одной из важных основ его профессионального авторитета.

На протяжении многих лет деятельность Владимира Ильича была связана с ЦНИИЭП зрелищных зданий и спортивных сооружений имени Б.С. Мезенцева. Здесь он прошёл путь от старшего инженера до руководителя научного направления, заместителя директора по научной работе и главного конструктора института. Эта работа позволила ему соединить исследовательскую деятельность, проектную практику и организацию научно-технического сопровождения сложных объектов.

Особое место в зрелом этапе профессиональной биографии В.И. Травуша занимает Московский международный деловой центр «Москва-Сити», где с 1992 года он выступал как главный конструктор. Этот проект стал одним из символов нового периода отечественного высотного строительства. В нём требовались уже не отдельные инженерные решения, а целостная культура работы с высотными зданиями, сложными конструктивными системами, современными требованиями безопасности и эксплуатации. Для Травуша участие в этом проекте стало подтверждением способности его научной и инженерной школы отвечать на вызовы новой эпохи.

С начала 2000-х годов значимым направлением его деятельности стала работа в Российской академии архитектуры и строительных наук. В статусе академика и вице-президента РААСН по направлению «Строительные науки» Владимир Ильич участвует не только в развитии научных исследований, но и в формировании профессионального содержания строительной отрасли. Здесь его опыт инженера-практика и учёного приобрёл институциональное значение: он оказался востребованным в экспертной, научной и образовательной среде.

В последующие годы В.И. Травуш продолжил работу в ведущих проектных и научно-образовательных организациях. Его деятельность в Экспериментально-научном проектном институте, затем в Проектном институте «Горпроект», участие в работе диссертационного совета НИУ МГСУ и статус советника при ректорате показывают, что его профессиональная роль не ограничивается проектированием. Он остаётся участником большой инженерной школы, где важны не только расчёты и объекты, но и передача опыта, развитие научных направлений, подготовка новых специалистов [1–38].

На этом этапе особенно ясно проявляется масштаб личности В.И. Травуша. Его путь соединяет несколько профессиональных измерений: науку, проектирование, экспертизу, образование и академическую деятельность. В этом соединении и заключается одна из главных особенностей его биографии. Он не просто участвовал в создании крупных сооружений, но последовательно формировал культуру ответственного инженерного мышления, без которой невозможны ни высотное строительство, ни работа с уникальными объектами, ни развитие современной строительной науки.

Признание и наследие. Признание Владимира Ильича Травуша складывается не только из высоких званий, премий и государственных наград. Оно, прежде всего, выражено в той профессиональной реальности, которую невозможно представить без его участия: в научных работах, инженерных решениях, построенных объектах, экспертной деятельности и в людях, для которых его опыт стал частью соб-



ственной профессиональной школы. В.И. Травуш является автором более трёхсот научных трудов, десятков патентов на изобретения и большого числа инженерных проектов. За этими цифрами стоит не формальная библиография, а многолетняя работа на стыке науки и практики. Его исследования и проектные решения связаны с теми областями, где инженерная мысль особенно близко подходит к пределу возможного: строительная механика, расчёт сооружений, высотное строительство, уникальные большепролётные конструкции, научно-техническое сопровождение сложных объектов.

Особенность его профессионального вклада состоит в том, что научные результаты не оставались только на страницах публикаций. Они находили продолжение в проектировании и строительстве, в расчётном обосновании крупных сооружений, в экспертной оценке ответственных решений. Именно поэтому наследие В.И. Травуша имеет не отвлечённый, а живой характер: оно связано с объектами, которые вошли в историю отечественного строительства, и с подходами, которые продолжают использоваться в современной инженерной практике.

Высокую оценку производственной, научно-исследовательской, образовательной и общественной деятельности подтверждают государственные и профессиональные награды. В.И. Травуш является лауреатом Государственной премии Российской Федерации в области науки и технологий, премии Совета Министров СССР, трёх премий Правительства Российской Федерации, премии имени И.А. Гришманова. Он награждён орденом Трудового Красного Знамени, Большой и Золотой медалями РААСН, Золотой медалью Российской академии художеств и другими знаками профессионального признания. Эти награды фиксируют разные стороны его труда: научную, проектную, организационную, общественную.

Однако подлинное значение такой биографии раскрывается не только в перечне достижений. Важнейшая часть наследия Владимира Ильича связана с передачей опыта. Его участие в работе Российской академии архитектуры и строительных наук, диссертационных советов, научных и технических комитетов, а также деятельность в системе инженерного образования показывают, что он остаётся не только создателем крупных решений, но и хранителем профессиональной преемственности, которая имеет особую ценность для профессии. Уникальные сооружения не возникают из одного удачного расчёта или одного смелого проектного жеста. За ними стоят школа, культура ответственности, способность проверять идею расчётом и опытом, готовность принимать решения, последствия которых будут жить десятилетиями. В этом смысле наследие В.И. Травуша заключается не только в построенных объектах и

опубликованных трудах, но и в самой культуре инженерного мышления, которую он представляет.

Вот почему разговор о признании Владимира Ильича Травуша неизбежно становится разговором о масштабе профессиональной жизни. Его путь показывает, как личный труд инженера может перерасти в явление научной и строительной культуры. В этом и заключается особая ценность юбилейного взгляда: он позволяет увидеть за датами, должностями и наградами главное - человека, чья работа стала частью большой истории отечественного строительства.

Инженерный путь. В профессиональной биографии Владимира Ильича Травуша особенно важно то, что его путь к реализации серьёзных инженерных задач начался не с кабинета и не с чертёжной доски, а с настоящей стройки. После окончания института он стремился попасть туда, где профессия раскрывается в полном масштабе, где решение инженера сразу проверяется делом, людьми, сроками, производством и самой логикой строительной площадки. Такой первой школой для него стал Темиртау.

В конце 1950-х годов Темиртау был одной из крупных строек страны. Под Карагандой возводился металлургический комбинат, большое промышленное предприятие со сложной инфраструктурой, доменным и коксохимическим производством, множеством вспомогательных сооружений. Для молодого инженера это была среда, где невозможно было оставаться только наблюдателем. Здесь нужно было быстро входить в дело, принимать решения, отвечать за людей и результат. Травуш приехал туда совсем молодым специалистом. Первый производственный опыт оказался одновременно и испытанием, и ускоренным взрослением. Он начинал мастером, затем стал прорабом, старшим прорабом, начальником участка. В его подчинении оказывались сотни рабочих, а вместе с ними и вся повседневная сложность стройки: организация работ, дисциплина, снабжение, взаимодействие подразделений, непредвиденные обстоятельства. В двадцать три – двадцать четыре года такая ответственность формирует профессиональный характер быстрее, чем самые обстоятельные лекции.

Темиртау дал ему то, что позднее будет особенно важно в работе над уникальными сооружениями: понимание сути и особенностей реального строительства. Не отвлечённого, не идеального, существующего только на бумаге, а живого, сложного, зависящего от множества участников. Здесь инженер учится видеть не только расчётную схему, но и людей, технологию, производство, последовательность работ. Он начинает понимать, что проектное решение должно быть не просто верным, но выполнимым; что за каждой линией чертежа стоит труд конкретных строителей; что ответственность кон-



структура продолжается далеко за пределами формулы. Именно поэтому ранний опыт Травуша в Темиртау нельзя рассматривать как краткий эпизод перед «настоящей» научной и проектной биографией. Напротив, это одно из её оснований. Большая стройка стала для него практической школой профессии, школой точности, организованности и уважения к производству. Позднее, работая над высотными и уникальными объектами, он будет соединять расчётную культуру учёного с твёрдым знанием того, как устроена строительная реальность.

Следующий поворот был связан с Москвой и аспирантурой. После нескольких лет работы на стройке Травуш поступил в аспирантуру Московского инженерно-строительного института. Этот переход от производственной практики к научной работе не был отказом от стройки. Скорее, он стал её продолжением на другом уровне. Практический опыт требовал осмысления, а инженерная интуиция нуждалась в строгом научном языке. Так в его биографии соединились две линии: строительная площадка и строительная механика.

Особую роль в этом становлении сыграл Борис Григорьевич Корнев, научный руководитель Травуша, крупный специалист в области строительной механики, динамики сооружений и расчёта плит, лежащих на упругом основании. Б.Г. Корнев принадлежал к числу тех учёных, для которых инженерная наука не сводилась к набору формул. Она была способом понять поведение конструкции, увидеть скрытую работу материала, основания, нагрузки, времени. Попадание в такую научную среду стало для молодого инженера важнейшим этапом профессионального роста.

У Корнева юбилар получил не только тему и направление исследований, но и доступ к большой научной культуре. После Темиртау, где каждый день требовал практического решения, аспирантура дала ему иной масштаб мышления. Здесь нужно было уже не просто организовать процесс, а выявить закономерность; не только построить, но и доказать; не только почувствовать правильность решения, но и обосновать его расчётом. Так формировался будущий инженер-конструктор, способный одинаково уверенно говорить с производством, наукой и проектной практикой. Важен и сам характер этого перехода: Травуш не пришёл в науку как человек, оторванный от строительства. Он пришёл туда с опытом большой строительной площадки, с пониманием цены инженерного решения, с памятью о производстве, где ошибка сразу становится видимой. Поэтому его дальнейший путь оказался естественным соединением практики и исследования. В нём не было разрыва между стройкой и расчётом: одно питало другое.

Московская аспирантура стала для Владимира Ильича не только временем научного становления, но и преддверием следующего крупного поворота. Именно в этой среде, через своего научного руководителя, он оказался связан с кругом выдающихся инженеров, работавших над крупнейшими задачами своего времени.

Завершение аспирантуры привело его к встрече, которая определила дальнейшую профессиональную судьбу: через Бориса Григорьевича Корнева он познакомился с Николаем Васильевичем Никитиным и вскоре вошёл в состав группы, работающей над проектом Останкинской телевизионной башни.

Так в начале пути Травуша последовательно сложились три школы: школа реальной стройки, школа научного анализа и школа уникального инженерного проектирования. Темиртау научил его ответственности перед производством. Аспирантура сформулировала строгий расчётный язык, а Б.Г. Корнев ввёл его в область большой строительной науки. Именно из соединения практики и науки и под влиянием личности Н.В. Никитина формулировалась профессиональная основа, которая позднее позволила Владимиру Ильичу Травушу стать одним из ключевых представителей отечественной инженерной школы [9–15].

Останкинская телебашня. После Темиртау и московской аспирантуры в профессиональной биографии Владимира Ильича Травуша наступил этап, который во многом определил дальнейший масштаб его инженерной судьбы. Этим этапом стала работа над Останкинской телевизионной башней, одним из самых смелых и узнаваемых сооружений своего времени.

Останкинская телебашня появилась не просто как новый объект городской инфраструктуры. Она была ответом на задачу государственного масштаба: стране требовался мощный телевизионный центр, способный обеспечить вещание для Москвы и Московской области. Но за этой практической необходимостью стояла задача куда более сложная.

Нужно было создать сооружение, которое по высоте, конструктивной смелости и уровню расчётной ответственности выходило за пределы привычной строительной практики. Первоначально рассматривались разные варианты опор для телевизионных антенн, включая металлические конструкции. Однако именно Николай Васильевич Никитин предложил принципиально иной путь: выполнить башню из монолитного предварительно напряжённого железобетона. Это решение было необычным, смелым и требовало уверенности в расчёте конструкции, обоснованного выбора материалов, и культуре проектирования. Вокруг этого замысла сложился автор-



Фото из открытых источников, Вертикальная панорама Останкинской телебашни [9; 13]

ский коллектив, в котором инженерная мысль работала на пределе возможностей своего времени.

Для Владимира Ильича Травуша вхождение в эту работу произошло почти как сюжетный поворот. Завершалась аспирантура, нужно было решать вопрос о дальнейшем профессиональном пути. Он пришёл к своему научному руководителю Борису Григорьевичу Корневу, чтобы обсудить будущее. В этот момент в

коридоре института они встретили Николая Васильевича Никитина. Корнев представил ему своего аспиранта, и Никитин ответил просто: «Как раз нужен сотрудник на телебашню». Так молодой инженер оказался внутри проектной группы одного из главных проектов отечественной строительной школы.

Эта встреча была не случайной удачей, а точкой соединения уже накопленного опыта. За пле-



чами у Травуша была реальная стройка в Темиртау, умение работать с производством, людьми и ответственностью. Аспирантура дала ему научную основу, расчётную дисциплину и понимание строительной механики. Останкинская телебашня стала местом, где эти две линии соединились: практическая школа стройки и строгая школа инженерной науки. Работа над ней требовала от молодого конструктора не только знания формул и методов расчёта. Она требовала особого профессионального состояния: точности, выдержки, готовности проверять решение с разных сторон, способности мыслить не отдельной деталью, а всем сооружением целиком. Здесь невозможно было спрятаться за частную задачу. Любой расчёт, любая конструктивная идея, любое принятое решение становились частью огромного инженерного организма, от которого зависела безопасность, устойчивость и долговечность уникального сооружения.

В воспоминаниях Травуша образ Никитина занимает особое место. Он говорит о нём не только как о руководителе проекта, но и как о человеке, чья манера думать и работать формировала вокруг себя профессиональную школу. Никитин был для него примером увлечённости, ясности мышления и внутренней собранности. Он рано начинал рабочий день, много думал, точно формулировал задачи и

умел держать в голове цельный образ замысла. Для молодого инженера такая среда была не просто местом работы. Это была школа отношения к профессии.

Особенно важным в этом опыте было понимание того, что уникальное сооружение рождается не только из смелой идеи, но и из способности довести эту идею до реализации. Травуш вспоминал, что при проектировании телебашни вокруг отдельных решений возникали споры, обсуждения, сомнения. Так происходит в каждом большом деле: замысел встречает сопротивление обстоятельств, интересов, привычных представлений, нормативной осторожности. Но именно в такой борьбе проверяется зрелость инженерной мысли. Недостаточно предложить новое решение. Нужно суметь его доказать, отстоять, рассчитать и воплотить.

Башня стала для Травуша первой крупной школой уникального проектирования. В ней соединились научный поиск, инженерная смелость, коллективная работа и ответственность перед будущей эксплуатацией. Это был объект, где расчёт не заканчивался моментом сдачи чертежей, а продолжался в наблюдениях, проверках, уточнениях, эксплуатации. Такая логика позднее станет характерной для всей деятельности Травуша: сложное сооружение требует сопровождения, внимания и долгой професси-



Фото по материалам: <https://vk.cc/сy6aff> Останкинская телебашня



ональной памяти. Символично, что связь Владимира Ильича с Останкинской телебашней не завершилась после её строительства. Башня, сданная в эксплуатацию 5 ноября 1967 года и ставшая на несколько лет самым высоким свободно стоящим сооружением в мире, осталась частью его профессиональной биографии на десятилетия.

В дальнейшем он участвовал в работах, связанных с её техническим развитием, расчётами, ремонтом и переоборудованием. Для инженера такого масштаба объект не исчезает из поля ответственности после торжественного открытия. Он продолжает жить, стареть, испытывать нагрузки, требовать наблюдения и решений.

Особенно ярко эта продолженная ответственность проявилась после пожара 2000 года. Останкинская телебашня пережила тяжёлую чрезвычайную ситуацию, последствия которой потребовали не формального ремонта, а глубокого инженерного анализа.

Нужно было оценить состояние конструкций, понять масштаб повреждений, разработать способы восстановления и обеспечить дальнейшую безопасную эксплуатацию сооружения. В этой работе оказался востребован не только расчётный аппарат, но и накопленный за десятилетия опыт наблюдения за башней.

Восстановление Останкинской телебашни стало ещё одним доказательством того, что уникальные сооружения нуждаются в долгой научно-технической судьбе. Их нельзя рассматривать как завершённый объект, однажды построенный и оставленный времени. Они требуют постоянного профессионального сопровождения, потому что в них сосредоточены не только конструкции, но и знания, эксперимент, риск, ответственность и общественная значимость. Башня была и остаётся крупнейшим телерадиовещательным центром, важным элементом жизни огромного мегаполиса.

Для Владимира Ильича Останкинская телебашня стала не просто одним из ранних проектов. Она стала точкой профессионального посвящения. В ней он вошёл в круг выдающихся инженеров, почувствовал масштаб уникального сооружения, прошёл школу Никитина, научился видеть в конструкции не только техническую задачу, но и судьбу объекта во времени. Именно здесь особенно ясно проявилась одна из главных черт его дальнейшей работы: умение соединять научную строгость, инженерную смелость и ответственность за результат. Телебашня открыла для Травуша путь к большим высотным сооружениям, но важнее другое: она задала меру профессии. После такого опыта инженер уже иначе смотрит на любую задачу. Он понимает, что за каждым крупным объектом стоит не только проект, но и школа. Не только расчёт, но и характер. Не только сооруже-

ние, но и люди, которые способны принять на себя его сложность[8–15].

Высотные горизонты. Останкинская телебашня стала для Владимира Ильича Травуша первой большой школой уникального сооружения. Но его профессиональная биография не остановилась на этом символе советской инженерной мысли. Напротив, опыт Останкино оказался началом долгого пути, в котором высотное строительство стало одной из главных тем его жизни. Со временем эта тема получила новое измерение: от отдельно стоящего инженерного объекта страна перешла к созданию целых высотных комплексов, новых городских силуэтов и сложнейших многофункциональных зданий.

Одним из таких этапов стал Московский международный деловой центр «Москва-Сити». Для отечественной строительной практики это был не просто новый район столицы, а принципиально иная проектная задача. Здесь речь шла уже не об одном уникальном сооружении, а о сложной городской системе, где рядом сосуществуют высотные здания, транспортные связи, подземные пространства, инженерная инфраструктура, деловые и общественные функции. Владимир Ильич Травуш вспоминал о «Москва-Сити» как о грандиозном проекте, которому были отданы десятилетия профессиональной работы. Он начал заниматься этим направлением в 1992 году и фактически оставался связан с ним на протяжении многих лет. Такой временной масштаб сам по себе важен: крупные инженерные проекты редко раскрываются сразу. Они проходят через замысел, конкурс, проектирование, корректировки, строительство, испытание реальностью, эксплуатацию. В каждом из этих этапов конструкторская мысль должна сохранять устойчивость и способность к уточнению.



Фото из открытых источников. В.И. Травуш в рабочем кабинете

«Москва-Сити» стал для Травуша школой уже зрелого инженерного лидерства. Если Останкинская



башня была входом в область уникального проектирования, то Сити потребовал координации множества решений, участников и объектов. Здесь высотное строительство перестало быть единичным исключением и стало частью новой городской практики. В этом смысле работа Травуша была связана не только с расчётом отдельных конструкций, но и с формированием самой культуры современного высотного строительства в России.

Важна и инженерная смелость этих решений. В воспоминаниях Травуша о «Москва-Сити» звучит не сухая отчётность, а профессиональная память человека, который видит за объектом сложность его рождения. Он говорит о больших фундаментных плитах, о непрерывном бетонировании, о масштабах работ, которые требовали безупречной организации. Но для юбилейного портрета особенно существенно другое: за этими цифрами стоит привычка брать на себя задачи, которые нельзя решить по инерции. Их нужно каждый раз заново продумывать, проверять, согласовывать и доводить до результата [15].

организацией проектирования, иными инструментами расчёта, иным уровнем координации. Лахта особенно важен как пример того, как инженерная мысль работает с архитектурным образом. Высотное здание такого уровня не может быть только суммой несущих элементов. Оно рождается из взаимодействия замысла, расчёта, технологии и строительства. Архитектор предлагает форму, заказчик формулирует задачу, конструктор ищет способ сделать эту форму возможной, безопасной и долговечной. В этом поиске неизбежны споры, уточнения, профессиональные столкновения. Но именно они и превращают красивую идею в построенное сооружение.

В одном из воспоминаний Травуш очень точно говорит о командной природе такой работы: он подчёркивает, что крупный объект создаётся вместе: архитекторами, конструкторами, специалистами разных направлений. Эта мысль важна для понимания его профессионального характера. Травуш не выстраивает образ одинокого автора, который будто бы единолично создаёт сложнейшие здания. Напротив, он говорит о команде как о естественной среде



Фото из открытых источников. Многофункциональный комплекс Лахта Центр, г. Санкт-Петербург, Лахтинский проспект, д.2, корп.3

Следующим ярким символом этой линии стал «Лахта Центр» в Санкт-Петербурге. Для Травуша этот объект закономерно воспринимается как один из самых значительных. Высота 462 метра, сложные грунтовые условия, особая форма здания, огромная ответственность за расчёт и строительство, всё это делает «Лахта Центр» не просто высотным сооружением, а проектом новой технологической эпохи. Здесь опыт, накопленный в течение десятилетий, оказался востребован в современной форме: с иной

настоящей инженерии. В этом есть особая профессиональная честность. При этом роль конструктора в такой команде вовсе не второстепенна. Она требует редкого сочетания твёрдости и гибкости. Конструктор обязан видеть пределы возможного, но одновременно искать путь к тому, чтобы архитектурный замысел не был разрушен расчётной осторожностью. Травуш формулирует это почти как внутренний принцип: сделать так, как хочет архитектор, но сделать так, чтобы это действительно могло быть по-



строено. В этой позиции раскрывается зрелость инженера, который не противопоставляет расчёт архитектуре, а помогает ей обрести надёжную форму [16–19].

Именно поэтому «Лахта Центр» в биографии Травуша важен не только как высотная отметка и не только как технический рекорд. Он важен как пример современной инженерной культуры, где красота формы должна быть подтверждена точностью расчёта, а смелость архитектурного образа опирается на дисциплину конструктивного решения. Здесь инженер работает не за кулисами архитектуры, а внутри самого процесса рождения объекта.

Между «Москва-Сити» и «Лахта Центром» просматривается важная линия профессионального развития. В первом случае речь идёт о становлении новой высотной городской среды в Москве, о долгом и сложном проектном процессе, растянутом на десятилетия. Во втором случае перед нами современная вершина высотного строительства, где опыт прошлого соединяется с новыми технологиями, материалами, методами расчёта и мониторинга. Вместе эти проекты показывают, что Травуш принадлежит не одному периоду, а нескольким инженерным эпохам. В этом и состоит особенность его профессионального пути. Он начинал в стране, где уникальные сооружения рассчитывались с помощью инструментов, которые сегодня кажутся почти символами другой инженерной эпохи. Затем он участвовал в проектах, где высотное строительство стало частью новой экономики, нового города, новой технологической среды. Но при всех изменениях неизменным оставалось главное: ответственность конструктора за устойчивость замысла, за безопасность сооружения и за доверие между архитектурой, наукой и строительством.

Высотные горизонты в биографии Владимира Ильича Травуша не сводятся к числам, метрам и рекордам. За ними стоит более глубокий смысл. Это путь инженера, который умеет работать с масштабом, не теряя внимания к сущности профессии. Он видит здание не только как объект, но и как результат совместного труда. Видит расчёт не только как процедуру, но и как форму ответственности. Видит архитектурный замысел не как помеху для конструктора, а как задачу, достойную профессионального поиска. От Останкинской телебашни через «Москва-Сити» к «Лахта Центру» выстраивается одна из главных линий жизни Травуша: линия высотного строительства как пространства инженерной смелости, научной строгости и коллективного творчества. В ней особенно ясно проявляется его способность соединять разные миры: архитектуру и механику, расчёт и строительство, идею и её реальное воплощение.

Щедрость инженерной жизни. Когда говорят о профессиональной биографии Владимира Ильича

Травуша, прежде всего вспоминают крупные сооружения: Останкинскую телебашню, высотные здания «Москва-Сити», «Лахта Центр» и другие объекты, вошедшие в историю отечественного строительства. Но масштаб его личности не исчерпывается перечнем построенного. В инженерной профессии подлинный вклад измеряется не только тем, что удалось создать самому, но и тем, что осталось в распоряжении следующих поколений: научные идеи, расчётные подходы, нормы, профессиональная культура, опыт экспертизы, школа мышления.

В этом смысле особенно точно звучит мысль о щедрости инженерной жизни. Владимир Ильич Травуш принадлежит к тем мастерам, чья работа не замыкается в границах отдельных проектов. Его деятельность развернулась сразу в нескольких пространствах: в проектировании, науке, экспертизе, нормотворчестве, образовании и академической работе. Каждое из этих направлений требует своего склада мышления, но в его биографии они не существуют отдельно. Они соединяются в цельную профессиональную позицию. Научное наследие Травуша связано прежде всего с теми вопросами, которые определяют надёжность и выразительность сложных сооружений: строительная механика, расчёт конструкций, работа зданий на деформируемом основании, высотное строительство, совершенствование железобетонных, монолитных, металлических, деревянных и сталежелезобетонных конструкций. В этих темах видно главное свойство его научной работы: она не была отвлечённой от практики. Напротив, она рождалась из задач реального строительства и возвращалась в практику в виде расчётных решений, проектных подходов и инженерных рекомендаций.

Более трёхсот научных трудов, десятки патентов и инженерных проектов в таком случае следует воспринимать не как сухой показатель продуктивности, а как свидетельство долгой и последовательной работы мысли. За каждым научным текстом стоит конкретная профессиональная необходимость: понять поведение конструкции, уточнить расчётную модель, оценить работу основания, повысить надёжность здания, предложить решение для объекта, который не укладывается в привычный набор типовых схем. Такая наука не находится «рядом» со строительством. Она работает внутри него.

Особое значение имеют патенты и изобретения. В них инженерная мысль проявляется в наиболее прикладной форме: не просто объяснить явление, а предложить способ действия. Для конструктора это чрезвычайно важно. Патент фиксирует момент, когда опыт, расчёт и профессиональная интуиция складываются в новое техническое решение. В биографии Травуша эта линия естественно продолжает его проектную деятельность: крупные сооруже-



ния ставили перед ним задачи, требовавшие не повторения готового, а поиска новых средств.

Не менее важна работа над нормами, сводами правил и пособиями по проектированию. В ней инженерный опыт приобретает особую общественную форму. Норма не принадлежит одному объекту и одному автору. Она становится частью профессионального языка, которым пользуются многие специалисты. Участие в разработке строительных норм и правил означает, что личный опыт мастера превращается в общий инструмент профессии. Это, пожалуй, одна из самых глубоких форм передачи знания: не через рассказ о прошлом, а через правила, по которым будут проектировать в будущем.

С этим связана и экспертная деятельность Владимира Ильича. Уникальные и большепролётные сооружения всегда требуют особого внимания, потому что в них цена ошибки слишком велика. Здесь недостаточно формально проверить соответствие документации. Требуется инженерное видение, способность почувствовать слабое место решения, оценить замысел в целом, увидеть связь между расчётом, конструкцией, строительством и эксплуатацией. Эксперт в такой области становится не внешним контролёром, а хранителем профессиональной ответственности. В этой роли особенно проявляется редкое качество Травуша: умение соединять строгость и уважение к замыслу. Крупный проект почти всегда возникает на пересечении интересов архитектора, конструктора, заказчика, строителя, эксперта, будущего пользователя. В таких условиях инженерная позиция не может быть ни пассивной, ни самоуверенно жёсткой. Она должна быть точной. Нужно уметь сказать «нельзя», когда решение опасно, и уметь найти путь к «можно», когда задача кажется почти невозможной. Именно такая точность и формирует доверие к конструктору.

Отдельная линия в биографии юбиляра связана с Российской академией архитектуры и строительных наук, НИУ МГСУ, диссертационными советами, научными и техническими комитетами. Это уже не только личная проектная работа, но и участие в устройстве профессиональной среды. Академическая деятельность требует другого масштаба ответственности: здесь речь идёт о развитии строительной науки, инженерного образования, экспертизы, научной преемственности. В этом пространстве опыт одного человека начинает работать как часть институциональной памяти профессии.

Особенно важно, что Травуш не ограничился ролью признанного практика. Он выступает и как наставник, и как научный руководитель, и как участник подготовки новых специалистов. Передача опыта в инженерии никогда не бывает простой.

Нельзя передать молодому конструктору только набор формул или перечень удачных реше-

ний. Нужно передать способ думать: как ставить задачу, как сомневаться, как проверять, как видеть соотношение во времени, как отвечать за последствия принятого решения. Это и есть настоящая профессиональная школа. Путь Владимира Ильича Травуша продолжает традицию, которую он сам воспринял от своих наставников. В начале его московского пути рядом были Борис Григорьевич Коренев и Николай Васильевич Никитин, люди большой научной и инженерной культуры. Позднее сам Травуш стал для многих представителей профессии такой же фигурой устойчивости, опыта и профессионального ориентира. Школа здесь понимается не как учреждение и не как формальная принадлежность, а как способ отношения к делу.

Владимир Ильич принадлежит к поколению инженеров, для которых профессия была не набором должностей, а долгим служением делу. В его биографии видны разные этапы отечественного строительства: большая промышленная стройка, советская школа уникальных сооружений, развитие научного расчёта, высотное строительство новой России, современные сверхсложные объекты, академическая и экспертная работа. Эти этапы соединяются не внешней хронологией, а внутренней непрерывностью профессиональной ответственности. Поэтому промежуточный итог его инженерной жизни нельзя выразить только списком объектов, трудов, патентов и наград. Всё это важно, но за всем этим стоит более глубокий результат. Травуш оставляет после себя не только построенные здания и научные публикации, но и меру профессии: уважение к расчёту, верность инженерной правде, умение работать в команде, готовность отвечать за сложное решение, способность передавать опыт дальше.

Именно эта мера делает его фигуру значимой не только для истории отдельных сооружений, но и для истории отечественной строительной науки. В жизни Владимира Ильича Травуша щедрость проявилась не в громких жестах, а в длительности и полноте профессионального труда. Он щедро работал, щедро думал, щедро участвовал в общем деле, щедро передавал накопленное знание. И потому его юбилей становится поводом говорить не только о пройденном пути, но и о той инженерной культуре, которую этот путь продолжает поддерживать.

Проекты и введенные в эксплуатацию объекты [3]:

- **Останкинская телебашня** (Москва), начало проектирования – 1959, Окончание строительства – 1967, первая реконструкция – 1973, вторая реконструкция, восстановление пожара 2000–2007;

- **Дворец спорта профсоюзов** (Архангельск), Начало проектирования 1969, окончание строительства – 1981;



Фото из открытых источников, возведение Останкинской башни

- **Монумент В.И. Ленина** у входа на Волго-Донской канал.

Проектирование – 1970. Памятник является самым большим из всех существующих и являлся одним из самых больших памятников реально жившему человеку, возведенный по проекту скульптора Евгения Вучетича, архитектора Михаила Полякова и конструктора Владимира Травуша.

- **Проект пространственных конструкций покрытий** (конкурс). Проектирование – 1970;

- **Метеовидовая башня**. (Москва, ВДНХ СССР). Проектирование – 1972.



Фото из открытых источников, Башня – 4000(Токио)

- **Универсальный демонстрационный зал с трибунами на 5000 мест** (конкурс). (Москва. Химки). Проектирование – 1975.

- **Театр оперы и балета** (конкурс, Болгария, София). Проектирование – 1973.

- **Башня-4000** (Япония, Токио), конструкторы – Н.В. Никитин, В.И. Травуш. Проектирование 1966–1969. На фото, Проект четырёх километровой башни Никитина Н.В. и Травуша В.И. в Токио (коллаж сделан с использованием реального чертежа башни) [20].

- **Кафе-ресторан** (Тверь). Проектирование – 1977.

- **Серия типовых деревоклеёных и металлических несущих и ограждающих конструкций** для массового строительства общественных зданий (балки, арки, фермы, рамы, панели) Проектирование – 1977, строительство – 1977–1990.

- **Высотная гостиница** (Тула). Проектирование – 1978.

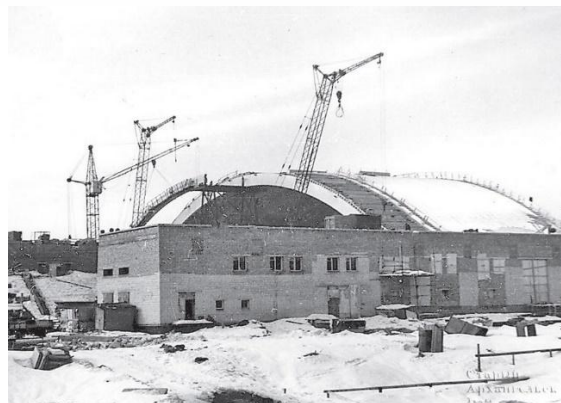


Фото из открытых источников. Дворец спорта профсоюзов (Архангельск) [21]

- **Аэропорт «Домодедово»** (Москва) Конкурс, проектирование – 1979.

- **Олимпийский дворец спорта «Динамо»** (Москва). Начало проектирования – 1977, окончание строительства – 1980.

- **Спортивный большепролетный комплекс «Юбилейный»** (Калинин – Тверь). Дворец спорта «Юбилейный». Начало проектирования – 1979–1982.



Архитекторы: Ю. Шварцбрейм, Я. Камкин, И. Заславская, Э. Исаев; инженеры: Е. Песков, Р. Иванова, Ф. Кохновер, М. Заполь, В. Травуш. Проектная организация: ЦНИИЭП им. Б.С. Мезенцева. Окончание строительства –1983. Реконструкция – 2002-2008.

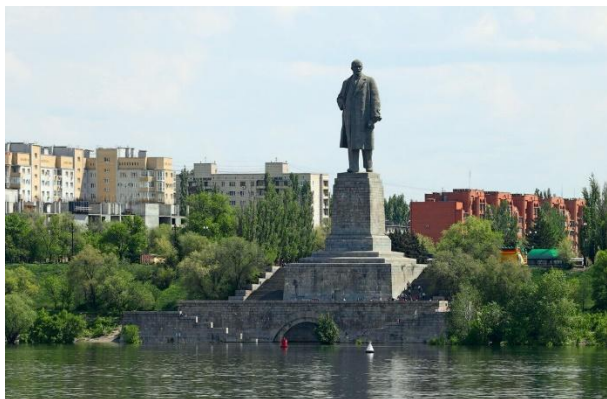


Фото из открытых источников. Монумент В.И. Ленина (Волгоград) [22]

- Памятник воинам-землякам (Узбекистан, Карши) [23]. Проектирование – 1975.

- Универсальный демонстрационный зал с трибунами на 5000 мест (конкурс, Москва, Измайлово). Проектирование -1975.

- Проект крытого велотрека с трибунами на 6000 мест (конкурс, Москва, Крылатское). Проектирование –1975.

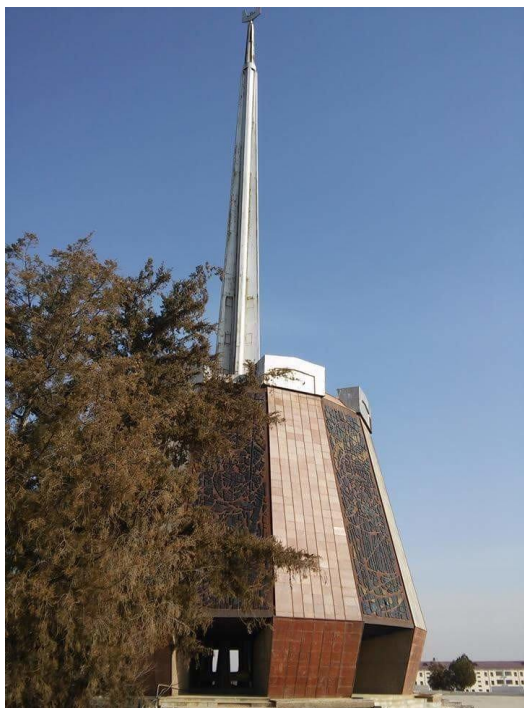


Фото Памятник воинам-землякам (Карши)

Калининский дворец спорта был построен как демонстрационный искусственный каток на берегу

Волги. Здание вместе со стадионом сформировало крупный спортивно-зрелищный комплекс. В его центре арена с искусственным льдом и трибунами на 2000 зрителей. В здании была предусмотрена трансформация зала с ледовой ареной, позволяющая использовать её для концертов, митингов, собраний, показа кинофильмов. Конструктивно это здание уникально для Твери, оно во многом опередило время. Клеёные деревянные конструкции, которые формируют каркас здания, определили его объёмно-пространственную структуру. Дерево было широко применено во внутренней и наружной отделке: в ограждении наружных балконов и галереи над ареной, в витражах и настенных рельефах, в трибунах.



Фото из открытых источников. Дворец спорта «Динамо» (Москва) [24]



Фото из открытых источников. Спортивный большепролетный комплекс «Юбилейный» (Тверь) [25]

- Здание Верховного Совета (Туркмения, Ашхабад). Проектирование – 1981.

- Общественный центр на 250 посетителей (Тверская область, Кимрский район, д. Малое Василёво). Проектирование – 1980–1984. Первая реконструкция – 2013. Вторая реконструкция – 2019.

- Спортивный корпус (Усть-Илимск). Проектирование – 1980.

- Сельский клуб на 250 посетителей (Россия, Тверская обл., д. Малое Василёво, совхоз «Х пятилетки»). Проектирование –1984.



Фото из открытых источников (фотограф Б. Кудояров). Здание Верховного Совета Туркменской ССР (Ашхабад) [26]

- **Общественный центр Тет Дефанс** (Франция, Париж). Конкурс, проектирование –1984.
- **Административное здание** (Туркмения, Ашхабад). Проектирование – 1984.
- **Театр оперы «Бастилия»** (Франция, Париж). Конкурс, проектирование –1984.
- **Теннисный центр спорткомплекса «Лаун-теннис»** (Москва). Типовой проект 292-8-15/16.87. ФОК в деревоклеёных конструкциях. Тип – 1. Проектирование – 1985–1987. Строительство – 1987–1988. Реконструкция – 2019–2020.
- **Спортивно-оздоровительный корпус в лёгких металлических конструкциях** (Сургут, Нижневартовск), Проектирование (ТП261-13-137.13.86) – 1986.
- **Двух зальный кинотеатр на 300 и 200 мест в лёгких металлических конструкциях** (Сургут, Нижневартовск), Проектирование (ТП261-13-138.13.866) – 1986.
- **Памятник В.И. Ленину** (Владивосток), проектирование – 1986, реконструкция 1970, реставрация 2017.
- **Лабораторный корпус ВИС** (Истра). Проектирование - 1986.
- **Спортивно-оздоровительный корпус с залом 36 x 18 м в деревоклеёных конструкциях** (Московская обл.). Проектирование (ТП-292-8-16.87) – 1987, строительство – 1987 – 1991.
- **Физкультурно-оздоровительный комплекс** (Москва) Проектирование (ТП-292-8-15.87) – 1987.
- **Высотная гостиница** (Узбекистан, Ташкент), проектирование –1987.
- **Центральный рынок** (Ржев, Тверская область). Начало проектирования – 1989, окончание строительства – 1990. Построен по проекту архитектурной мастерской ОСК ЭНПИ; архитектор М. Бубнов, инженеры В. Травуш, М. Заполь.



Фото из открытых источников. Здание Центрального рынка города Ржев

- **Бассейн в деревоклеёных конструкциях с ванной 25x8.5 м** (Московская обл.). Проектирование (ТП 291-3-46.88) – 1988, строительство – 1988–1991.
- **Проект Памятника Победы** (Москва). Проектирование (конкурс) – 1988.



Фото из открытых источников. Музей Хо Ши Мина (Ханой) [28]

- **Музей Хо Ши Мина** (Вьетнам, Ханой). Проектирование – 1989, строительство 1990.
- **Полносорные модульные здания различного назначения** (Московская обл., Архангельская обл., Тверская обл., Башкортостан, Республика Коми). Проектирование – 1988, строительство – 1988–1991.
- **Павильон СССР на Всемирной выставке «ЭКСПО-92»** (Испания, Севилья). Проектирование (конкурс) – 1989.
- **Центр науки, информатики и новых технологий «Дом–окно в III тысячелетие»** (Москва). Проектирование – 1980–2007.
- **Театр морских животных** (Сочи). Проектирование – 1990.
- **Спортивные сооружения МИСИ им. В.В. Куйбышева** (Москва). Проектирование –1990.

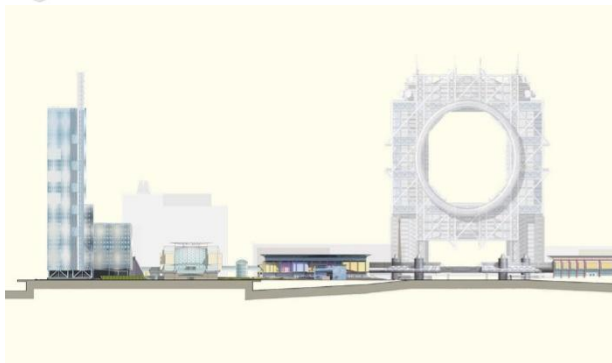


Фото из открытых источников, Нереализованный проект «Центр науки...»

- Храм-памятник в честь 1000-летия Крещения Руси (Москва). Проектирование (конкурс) –1990.



Фото из открытых источников, «Торгово-пешеходный мост «Багратион» (Москва)



Фото из открытых источников, «Башня 2000» (Москва)

- Офисный центр «Башня 2000» [29] (Москва). Проектирование – 1991, начало строительства 1996 год, завершено в 2001. «Башня 2000», это самое первое здание комплекса Москва Сити, со 130-ти метрового остеклённого самого знакового здания, началась история самого современного офисного комплекса города.

- Торгово-пешеходный мост «Багратион» через реку Москва в комплексе Московского международного делового центра «Москва-Сити» (Москва). Начало проектирования –1996, окончание строительства –1997, реконструкция интерьеров –2020.

- Республиканский ипподром (Туркмения, Ашхабад). Проектирование – 1991.
- Центральное ядро ММДЦ «Москва-Сити» (Москва). Начало проектирования – 1992, окончание строительства – 2020.
- Спорткомплекс «Москворечье» (Москва). Проектирование – 1993.
- Башня «Россия» в ММДЦ «Москва-Сити» (Москва). Проектирование – 1993.
- «Морской экополис» (Украина, Ольвия). Проектирование (конкурс) – 1993.
- Киноконцертный комплекс (Владикавказ). Проектирование (конкурс) –1993.
- Административно-хозяйственное здание «Вагонреммаша» (Москва). Проектирование – 1994.
- Реконструкция подземного пространства Тверской улицы (Москва). Проектирование – 1994.
- Малоэтажное жильё, Проектирование (конкурс) – 1994.
- Трибуны Центрального стадиона Архангельска (Архангельск). Проектирование – 1995.
- Конструкции декораций с механизмами подъёма для спектакля «Свадьба Кречинского» в Малом театре (Москва). Проектирование –1996.
- Малоэтажное индивидуальное жильё, Проектирование (конкурс) –1996.
- Радиотелевизионная башня (Белоруссия, Минск) Проектирование – 1997.



- Реконструкция муниципального стадиона «Вымпел» (Королёв). Проектирование – 1997.
- Подземные стоянки автомобилей под проезжей частью и полосами отвода улиц, проспектов и внутригородских дорог (Москва). Проектирование – 1997.
- Здание управления социальной защиты населения (Москва). Проектирование -1997.
- Мемориал «Горэ» (Дакар, Сенегал). Проектирование (конкурс) – 1997.
- Комплекс общественных зданий (Москва). Проектирование –1997.
- Памятник героям противовоздушной обороны в ВОВ (Москва). Проектирование – 1994–1995, строительство -1995.
- Спортивный зал общественного центра экспериментального жилого комплекса (Нижний Новгород). Проектирование – 1999.
- Здания Евровокзала (Москва). Проектирование (конкурс) – 1999.
- Ледовый дворец «Крылатское» (Москва). Начало проектирования – 2000. Завершение строительства – 2004. Реконструкция – 2007–2008.

- Комплекс зданий Правительства Москвы и Мосгордумы (Москва, ММДЦ «Москва-Сити», «Правительственный квартал»). Проектирование – 2000–2002.
- Реконструкция Центрального дома художника и Государственной Третьяковской галереи на Крымском валу (Москва). Проектирование (конкурс) – 2001.
- Многофункциональный комплекс «Город столиц» (Москва). Начало проектирования – 2002, завершение строительства – 2009.
- Многофункциональный комплекс Башня «Федерация» (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Начало проектирования – 2003, завершение строительства – 2017.
- Монумент «Древо жизни» (Москва). Проектирование – 2004.
- Многофункциональный комплекс Башня «Империя» (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Начало проектирования – 2004.
- Бизнес-центр «Москва» (Казахстан, Нур-Султан – Астана) [31]. Проектирование – 2004, завершение строительства – 2011.



Фото из открытых источников. Ледовый дворец «Крылатское» (Москва) [30]



Фото из открытых источников. Бизнес-центр «Москва» (Астана)

- Многофункциональный комплекс Башня «Россия» (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Проектирования – 2005–2011.
- Конгресс-центр (Вьетнам, Ханой). Проектирование – 2005.
- Футбольный стадион в западной части Крестовского острова (Санкт-Петербург). Проектирование (конкурс) – 2006.
- Стадион с многофункциональным спортивным комплексом «Москвич» (Москва). Проектирование – 2007–2019.
- Бизнес-центр на Зубовском бульваре (Москва) [33]. Начало проектирования – 2007, завершение строительства – 2011.
- Центральный стадион Олимпийских игр 2014 года (Сочи). Проектирование (конкурс) – 2009.



Фото из открытых источников. Стадион «Москвич» (Москва) [32]

- Дворец спорта «Большой» (Сочи, Имеретинская низменность). Начало проектирования – 2010, завершение строительства – 2012.

- «Меркури Сити Тауэр» (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Проектирование – 2013, строительство завершено – 2013.

- Многофункциональный комплекс Башня «Евразия» (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Проектирование – 2013, завершение строительства – 2014.



Фото из открытых источников.
БЦ на Зубовском бульваре (Москва)



Фото из открытых источников, МФК Башня «Эволюция» (Москва)

- Общественно-деловой центр «Охта» (Санкт-Петербург). Проектирование – 2010.

- Московский многофункциональный музейно-выставочный центр «Провиантские склады» (Москва). Проектирование – 2011.

- Многофункциональный комплекс Башня «Эволюция» (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Начало проектирования – 2008, завершение строительства – 2015.

- Многофункциональный комплекс «Лахта Центр» (Санкт-Петербург). Начало проектирования – 2011, завершение строительства – 2018.



Фото из открытых источников. МФК «Лахта Центр» (Санкт-Петербург)



Фото из открытых источников. Юбиляр - В.И. Травуш [38]

- **Музей современного искусства** (Государственный центр современного искусства, ГЦСИ) не был введён в эксплуатацию на Ходынском поле. В 2014 году состоялась церемония закладки первого камня нового здания. Проект строительства здания ГЦСИ на этой территории был остановлен. В сентябре 2018 года строительство отменено из-за отсутствия финансирования.

- **Первая очередь универсального спортивного комплекса «Махачкала»** (Махачкала). Начало проектирования – 2015. Строительство не завершено.

- **Многофункциональный комплекс Башня Grand-Tower** (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Проектирование – 2015.

- **Бизнес-центр «Сбербанк-Сити»** (Москва, «Миракс Плаза»). Проектирование – 2015, строительство завершено – 2021.

- **Стадион «Газпром Арена»** (бывший «Зенит Арена») (Санкт-Петербург). Проектирование - 2006-2016. Строительство – 2007–2017.

- **Транспортный терминал** (Москва, ММДЦ «Москва-Сити»). Проектирование – 2017.

- **Храм Покрова**, реконструкция (о. Кизи, Республика Карелия, с 2020 по настоящее время объект находится в процессе реконструкции);

- **Ведутся работы по реконструкции и реставрации с декабря 2023 до осени 2026 года [34] дома архитектора Константина Мельникова** в Кривоарбатском переулке (Москва);

- **Православный храм** (Салехард, 2024) и многие другие объекты.

- **Участник разработки многих строительных норм и правил** (СНиП), сводов правил (СП), пособий по проектированию [1-3; 5; 8].

Поздравление. Юбилейные даты располагают не только к подведению итогов, но и к особому, более внимательному взгляду на человеческую жизнь: в такие дни особенно ясно видно, что за официальными званиями, научными трудами, построенными объектами, премиями и должностями стоит главное: человек, его характер, его верность профессии, его стабильность и способность оставаться нужным людям и делу на протяжении многих десятилетий.

Дорогой Владимир Ильич!

Ваша жизнь давно стала частью истории отечественной строительной науки, но для тех, кто знает вас лично, эта история имеет не только академический и профессиональный смысл. Она наполнена живой человеческой теплотой, уважением, памятью о встречах, разговорах, совместной работе, дружбе и той особой атмосфере доверия, которая возникает рядом с человеком большого внутреннего достоинства.

Ваш профессиональный путь поражает своей цельностью. В нём есть всё, что составляет судьбу настоящего инженера: школа большой стройки, строгая наука, уникальные сооружения, смелые расчётные решения, работа с архитекторами, экспертиза, педагогика, академическая деятельность, передача опыта новым поколениям. Но особенно важно, что на каждом этапе вы оставались не просто участником больших дел, а человеком, который понимал меру ответственности за них.

Вы принадлежите к тому редкому поколению инженеров, для которых профессия была не только специальностью, но и образом жизни. Для вас конструкция никогда не была отвлечённой схемой, а расчёт не сводился к формальной процедуре. За каждым сооружением вы видели людей, время, город,



будущую эксплуатацию, безопасность, красоту и доверие. В этом, наверное, и состоит подлинная культура конструктора: не только найти решение, но и отвечать за его судьбу.

Мы часто говорим о выдающихся объектах, связанных с вашим именем: многих и многих сооружений, ставших заметными вехами строительной истории страны. Но ещё важнее то, что за этими объектами стоит целая школа мышления. Школа точности, выдержки, инженерной смелости и уважения к труду каждого участника большого дела. У каждого большого инженера есть свои построенные сооружения. Но у по-настоящему выдающегося инженера есть ещё и невидимое наследие: ученики, коллеги, научные направления, нормы, экспертные решения, профессиональные привычки, которые продолжают жить после завершения конкретного проекта. Ваше наследие именно таково. Оно не ограничивается списком трудов и объектов. Оно продолжается в людях, которым вы помогли лучше понять профессию.

Ваша жизнь напоминает нам, что прочность бывает не только у конструкций. Прочность бывает у характера. У дружбы. У научной школы. У профессиональной совести. У верности делу, которому человек посвящает десятилетия. И если сооружения проверяются нагрузками, временем и эксплуатацией, то человеческий путь проверяется ещё строже: способностью сохранять достоинство, щедрость, ясность мысли и доброжелательность. Эту проверку вы прошли с редкой убедительностью.

От всей души желаем юбиляру крепкого здоровья, душевного спокойствия, благополучия, здоровья близкими. Пусть рядом остаются люди, которые ценят вас не только как выдающегося инженера,

учёного и академика, но и как мудрого, доброжелательного, тонкого и сильного человека. Пусть каждый новый день приносит вам ощущение нужности, уважения и благодарности за огромный труд, которому вы посвятили свою жизнь.

Дорогой Владимир Ильич, примите наши самые искренние поздравления! Желаем вам долгих лет жизни, светлых мыслей, добрых встреч и той спокойной радости, которую даёт человеку сознание честно и щедро прожитой профессиональной судьбы!

*С глубоким уважением
и сердечной признательностью,
Владимен Васильевич Петров,
Сергей Михайлович Анпилов.*

Библиографический список

1. Информация и Фото из открытых источников, архива РААСН. URL: <https://raasn.ru/structure/leadership/list/person/361>
2. URL: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=562536
3. По материалам издания. Е. Петухова Инженер – конструктор Владимир Травуш. Екатеринбург : TATLIN, 2021 – 240 с. ISBN 978-5-00075-300-2, www.tatlin.ru
4. Гнедовский, С.В. Конструктор и архитектура. К 85-летию академика Владимира Ильича Травуша / С.В. Гнедовский // Academia. Архитектура и строительство. – 2021. – № 2. – С. 127-133. – END BRQLSK. URL: <https://archvestnik.ru/2021/10/18/v-i-travushu-85-s-yubileynoy-vystavki-v-tsda/>
5. Фото из открытых источников, URL: <https://www.google.com/maps/@48.4632918,35.0417917,3a,75y,141.96h,86.9t/> Днепропетровская область, г. Днепр, ул. Короленко 17, июль 2015.



6. Травуш, Владимир Ильич. Изгиб полубесконечных плит, лежащих на упругом основании : диссертация ... кандидата технических наук : 05.00.00. – Москва, 1966. – 110 с. : ил. OD Дк 66-5/2625.
7. Травуш, Владимир Ильич. Расчет строительных конструкций на деформируемом основании: диссертация ... доктора технических наук: 01.02.03. Соппротивление материалов и строительная механика - Москва, 1976. - 354 с. : ил. OD Дд 78-5/90.
8. По материалам: Травуш, В. И. 50-летний юбилей Останкинской телебашни – железобетонного символа Москвы / В. И. Травуш // Вестник НИЦ Строительство. – 2018. – № 1(16). – С. 126-132. – EDN YNSGFJ. URL: https://elibrary.ru/download/elibrary_32379364_69851815.pdf
9. Никитин, Николай Васильевич. ОСТАНКИНСКАЯ ТЕЛЕВИЗИОННАЯ БАШНЯ / Коллектив авторов под редакцией Н. В. Никитин, д-р техн. наук. — Москва : Знание, 1969, М: Стройиздат, 1972. – 217 с.
10. URL: https://историяотпервоголица.пф/events/current_event.php?current_event_id=42660.
11. URL:<https://prikladmeh.ru/teacher/Korenev.htm>
12. По материалам издания: Дыховичный Ю.А., Никитин Н.В. Жизнь и творчество. М., Стройиздат, 1977. 199 с. с ил. Библиографический очерк.
13. URL:https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fcdn4.telesco.pe%2Ffile%2Fd3HiuOo3yhfC7VPyltANpSb_e83H4MZvLtt7xDWrcC2oMMk8lkaCz2WkUEGQflbOkUApfhKULxdypIP1r5bAH9E1vre96wd8CzPrtzCEkOBCEdaJpbHc0krGty7HQPtouqadR4F5C6A4V-z_-7q8xmaFrXfhvbCj8VtpSyngQNeYzL_JFvVb9lOyWmUzCtyf1okMRrNqoLnjDx25jp5l0bEM2b5r6C6u58b3clkeBcanA12DgzwlHt_o-qZsTjLV7XlUaO0g6u80gAUayJp FTILRICdoFz0WkKAYQbHtlR9zYZzfXpHybLGDcCmkEnymegRfbLfO
14. URL: https://историяотпервоголица.пф/events/current_event.php?current_event_id=42666
15. URL: https://историяотпервоголица.пф/events/current_event.php?current_event_id=42668
16. URL:https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fwikipedia%2Fcommons%2Fthumb%2F2%2F2c%2F%25D0%259B%25D0%25B0%25D1%2585%25D1%2582%25D0%25B0_%25D1%2586%25D0%25B5%25D0%25BD%25D1%2582%25D1%2580_2021.jpg%2F1280px-25D0%259B%25D0%25B0%25D1%2585%25D1%2582%25D0%25B0_%25D1%2586%25D0%25B5%25D0%25BD%25D1%2582%25D1%2580_2021.jpg&lr=240&pos=0&rpt=simage&source=serp&text=Лахта%20центр%20фото
17. URL:<https://gorproject.ru/projects/lakhta-center/>
18. Конструктивные решения высотного здания "Лахта Центр" в Санкт-Петербурге / Е. А. Илюхина, С. И. Лахман, А. Б. Миллер, В. И. Травуш // Academia. Архитектура и строительство. – 2019. – № 3. – С. 110-121. – DOI 10.22337/2077-9038-2019-3-110-121. – EDN MLORRC.
19. По материалам сайта, Текст интервью: Мария Элькина, фото: Евгения Безрук, Станислава Забурдаева, для Собака.ru: URL:<https://www.sobaka.ru/city/urbanistics/181711>
20. Сказание о великом конструкторе. - М.: «Нефть и газ», 2007. - 184 с. - ISBN 5-7246-0416-7. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Башня_Никитина_-_Травуша_4000
21. URL:https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fpastar.ru%2Fimages%2Fjoomlart%2Farticle%2F2ff3fa6960b52e3c842fd94fee5eb122ab.jpg&lr=240&p=1&pos=39&rpt=simage&source=serp&text=Дворец%20спорта%20профсоюзов%20Архангельск%20фото
22. URL: <https://dzen.ru/a/XIWhacktrwCOCffe>
23. URL: <https://ok.ru/group/50641871569029/topic/67684745399173>
24. URL: [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Favatars.dzeninfra.ru%2Fgetzen_doc%2F1880126%2Fpub_5f16dad001eac43ced7bf51c_5f27b572a34bc4540c09d915%2Fscale_1200&lr=240&pos=20&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=-%20Олимпийский%20дворец%20спорта%20«Динамо»%20\(Москва\)%20-%201980%20Фото](https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Favatars.dzeninfra.ru%2Fgetzen_doc%2F1880126%2Fpub_5f16dad001eac43ced7bf51c_5f27b572a34bc4540c09d915%2Fscale_1200&lr=240&pos=20&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=-%20Олимпийский%20дворец%20спорта%20«Динамо»%20(Москва)%20-%201980%20Фото)
25. URL: <https://tverisport.ru/wp-content/uploads/2020/10/Dvoretz-sport.jpg>; https://vk.com/wall-214320705_110?w=wall-214320705_110
26. URL: <https://visualhistory.livejournal.com/349447.html>
27. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Здание_Центрального_рынка_г._Ржев.jpg
28. URL: [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fcommons%2Fthumb%2F%2F7%2FHanoi_-_Ho_Chi_Minh_Museum_0002.JPG%2F250px-Hanoi_-_Ho_Chi_Minh_Museum_0002.JPG&lr=240&pos=1&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=-%20Музей%20Хо%20Ши%20Мина%20\(Вьетнам%2C%20Ханой\).%20Проектирование%20-%201989%2C%20строительство%201990.%20фото](https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fupload.wikimedia.org%2Fcommons%2Fthumb%2F%2F7%2FHanoi_-_Ho_Chi_Minh_Museum_0002.JPG%2F250px-Hanoi_-_Ho_Chi_Minh_Museum_0002.JPG&lr=240&pos=1&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=-%20Музей%20Хо%20Ши%20Мина%20(Вьетнам%2C%20Ханой).%20Проектирование%20-%201989%2C%20строительство%201990.%20фото)
29. URL: <https://башня2000.бизнесцентр.москва/>
30. Авторство: Ice.sport.center. Собственная работа, CC BY-SA 4.0. URL: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=46609970>; <https://web.archive.org/web/20081109204458/http://www.skating-palace.ru/about/info/ist/>; [https://ru.wikipedia.org/wiki/Крылатское_\(ледовый_дворец\)](https://ru.wikipedia.org/wiki/Крылатское_(ледовый_дворец)).
31. URL: https://www.votpusk.ru/article/attractions/kazakhstan/nursultan/biznes_centr_moskva-a; [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fexpbiz.ru%2Fwp-content%2Fuploads%2Fcache%2F3d592713db2726f26fdbd4e019aaf63_L.jpg&lr=240&pos=6&rpt=simage&source=serp&stypе=i mage&text=-%20Бизнес-центр%20«Москва»%20\(Казахстан%2C%20Нур-Султан\).%20фото](https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fexpbiz.ru%2Fwp-content%2Fuploads%2Fcache%2F3d592713db2726f26fdbd4e019aaf63_L.jpg&lr=240&pos=6&rpt=simage&source=serp&stypе=i mage&text=-%20Бизнес-центр%20«Москва»%20(Казахстан%2C%20Нур-Султан).%20фото)
32. URL: <https://stroim.mos.ru/gallery/5245>; [https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fstorage.myseldon.com%2Fnews-pict-fd%2FFDFB780984CC232D5DBF52EB191E3D17&lr=240&p=1&pos=22&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=%20Стадион%20с%20многофунк циональным%20спортивным%20комплексом%20«Москвич»%20\(Москва\).%20фото](https://yandex.ru/images/search?img_url=https%3A%2F%2Fstorage.myseldon.com%2Fnews-pict-fd%2FFDFB780984CC232D5DBF52EB191E3D17&lr=240&p=1&pos=22&rpt=simage&source=serp&stypе=image&text=%20Стадион%20с%20многофунк циональным%20спортивным%20комплексом%20«Москвич»%20(Москва).%20фото)
33. URL: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moscow,_Zubovsky_11A_May_2023_01\(DXO\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Moscow,_Zubovsky_11A_May_2023_01(DXO).jpg)
34. URL: <https://www.theartnewspaper.ru/posts/20260414-wrog/>
35. Травуш, В.И. Бетонирование нижней плиты коробчатого фундамента комплекса «Лахтацентр» / В.И. Травуш, А.И. Шахворостов // Высотные здания. – 2015. – №1. – С. 92–101.
36. Экспериментальные исследования сталежелезобетонных конструкций на вне центрнное сжатие / Тра-



вуш В.И., Конин Д.В., Рожкова Л.С. [и др.] // Academia. Архитектура и строительство.–2016. – №3. – С. 127–135.
37. «ЛактаЦентр»: автоматизированный мониторинг деформаций несущих конструкций и основания / Тра-

вуш В.И., Шахраманьяна.М., Колотовичев Ю.А. [и др.] // Academia. Архитектураи строительство. – 2018. – №4 .– С.94–108.
38. URL: <https://kir.aalex.ru/articles/27travush/>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 17.05.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 17.05.2026; accepted for publication 17.06.2026.



ПОЗДРАВЛЯЕМ АКАДЕМИКА А.Т. БЕККЕРА С 80-ЛЕТНИМ ЮБИЛЕЕМ



26 июня 2026 года исполнилось 80 лет **БЕККЕРУ Александру Тевьевичу**, выдающемуся ученому, академику РААСН, академику Международной инженерной академии, профессору, доктору технических наук, Заслуженному работнику высшей школы РФ, Почетному работнику высшего профессионального образования РФ, председателю Координационного совета Дальневосточного регионального учебно-методического центра высшего образования по образованию в области инженерного дела, техники и технических наук, научному руководителю Политехнического института Дальневосточного федерального университета, члену Международного общества шельфовой и полярной технологии ISOPE, PACOMS, члену Международной ассоциации гидравлических исследователей, члену МИА, председателю ассоциации «Газонефтяной комплекс ДВ РФ», председателю ДВРО РААСН, члену международного общества (International Society Offshore and Polar Engineering (ISOPE)), члену международной ассоциации гидравлических исследователей (IAHR, International Association Hydraulic Researches), члену Редакционного совета сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика».

Вся жизнь А.Т. Беккера, после окончания в 1969 году Дальневосточного политехнического института (ДВПИ им. В.В. Куйбышева) по специальности «Гидротехническое строительство водных путей и портов», связана с высшей школой.

Александр Тевьевич прошел путь от лаборанта, ассистента, до заведующего кафедрой, директора Инженерной школы Дальневосточного федерального университета и от транспортного рабочего до генерального директора крупной научно-произ-

водственной компании. Под руководством А.Т. Беккера сформирована научная школа в области морского гидротехнического строительства и морской гляциологии. Он автор концепции вероятностного описания ледяного покрова и его воздействий на морские гидротехнические сооружения (МГТС), ряда математических моделей, компьютерных программ по моделированию ледовых нагрузок и воздействий на МГТС континентального шельфа и технологий по их защите и повышению надежности.



Основные направления деятельности юбиляра: безопасность инженерных сооружений, морское гидротехническое строительство, морская гляциология, ледотехника.

Руководитель проектов по освоению месторождений нефти и газа на шельфе Охотского моря, более 50 проектов в области промышленного и гидротехнического строительства на Дальнем Востоке.

Руководитель научной школы в области морского гидротехнического строительства, морской гляциологии и ледотехники. Является руководителем аспирантуры по программам: 05.23.07 «Гидротехническое строительство», 2.1.6 «Гидротехническое строительство, гидравлика и инженерная гидрология», научным руководителем магистратуры 08.04.01 «Шельфовое и прибрежное строительство», научным руководителем международной зимней школы «Ледовая механика» (Ice Mechanics), руководителем Международного научно-образовательного центра «Дальневосточный Арктический инженеринговый центр» (МНОЦ «Арктика»).

Автор более 530 научных и учебно-методических работ, в том числе 9 монографий, 6 учебных пособий, 77 изобретений РФ, 5 свидетельств РФ о государственной регистрации программ для ЭВМ. Руководитель крупных НИР и НИОКР по обоснованию оптимальных конструкций морских нефтегазовых сооружений, научно-технического сопровождения проектирования и строительства уникальных объектов по освоению месторождений нефти и газа на континентальном шельфе дальневосточных морей. Автор ряда реализованных научных разработок и технологий в области методов расчета портовых и шельфовых МГТС.

Главный редактор научного журнала «Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета», член Редакционного совета сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика».

Научные результаты признаны реальным сектором экономики и государством. Беккеру А.Т. присвоено звание Заслуженный работник высшей школы РФ (1999), награжден: орденом Дружбы (2005), удостоен многочисленными профессиональными наградами и дипломами, в их числе: звание «Инженер года» (2002), диплом и медаль РААСН за лучшую монографию (2006), золотая медаль Международной инженерной академии (2007), знак международного общества шельфовых и полярных исследований «ISOPE-PACOM AWARD» (2004), золотой знак Российской инженерной академии (2005); премия «Профессор года» Российского профессорского собрания (2021); диплом РААСН за лучшее научно-техническое сопровождение проектирования и строительства уникального объекта (ССК «Звезда») (2022), Почетный изобретатель, золотая медаль ВВЦ, дипломы ISOPE, им. В.П. Вологодина «За лучшую НИР», дипломами конкурсов «Профессор ДВГТУ-100» и профессорского клуба ЮНЕСКО¹ и др.

Исключительный профессионализм и ответственное отношение к своему делу позволяют Александру Тевьевичу успешно справляться со сложнейшими инженерными задачами на высочайшем уровне.

Желаем Александру Тевьевичу новых творческих успехов, крепкого здоровья, бодрости, успехов, удачи, благополучия, счастья, реализации намеченных целей и задач!

Уважаемый Александр Тевьевич!

***Редакционный совет, редакционная коллегия
сетевого научно-практического издания
«Эксперт: теория и практика»
искренне поздравляют Вас с юбилеем,
желают Вам крепкого здоровья, благополучия
и активного творческого долголетия!***

¹ URL:https://www.dvfu.ru/dvrumc/news/yubiley_80_let_doktoru_tekhnicheskikh_nauk_professoru_bekkeru_aleksandru_tevevichu/



CONGRATULATIONS ON THE 80-YEAR ANNIVERSARY TO THE ACADEMICIAN A.T. BEKKER

On June 26, 2026, **Alexander Tevyeich BEKKER**, an outstanding scientist, academician of the Russian Academy of Natural Sciences, academician of the International Academy of Engineering, Professor, Doctor of Technical Sciences, Honored Worker of Higher Education of the Russian Federation, Honorary Worker of Higher Professional Education of the Russian Federation, Chairman of the Coordinating Council of the Far Eastern Regional Educational and Methodological Center for Higher Education in the field of engineering, technology, Candidate of Technical Sciences, Scientific Director of the Polytechnic Institute of the Far Eastern Federal University, member of the International Society of Offshore and Polar Technology ISOPE, RASOMS, member of the International Association of Hydraulic Researchers, member of MIA, Chairman of the Association "Gas and Oil Complex of the Far East of the Russian Federation", Chairman of the Far East Association of the Russian Academy of Sciences, member of the International Society Offshore and Polar Engineering (ISOPE), member of the International Association of Hydraulic Researchers (IAHR, International Association Hydraulic Research), member of the Editorial Board of the online scientific and practical publication "Expert: theory and Practice".

Dear Alexander Tevievich!

*Editorial board, editorial panel of the network
scientific and practical publication
"Expert: Theory and Practice"
sincerely congratulate you on your anniversary,
wish you strong health, well-being and active creative longevity!*



ПОЗДРАВЛЯЕМ Д.В. КОЗЛОВА С ИЗБРАНИЕМ АКАДЕМИКОМ РААСН



КОЗЛОВ Дмитрий Вячеславович
академик отделения строительных наук РААСН (2026)

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой гидравлики и гидротехнического строительства НИУ МГСУ, Заслуженный работник гидроэнергетики, Почётный строитель России, Почётный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, Почётный работник водного хозяйства, Почётный работник агропромышленного комплекса России, член Редакционного совета сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика», академик-секретарь отделения строительных наук РААСН

Уважаемый Дмитрий Вячеславович!

От всей души поздравляем Вас с избранием академиком РААСН! Это значимое событие в Вашей научной карьере, которое свидетельствует о признании Вашего огромного вклада в науку и Вашего выдающегося таланта.

Ваш профессионализм, неугасимая преданность делу и стремление к новым открытиям вдохновляют многих. Мы уверены, что Ваш опыт и знания будут и впредь способствовать развитию науки, а

Ваши исследования откроют новые горизонты и приведут к значимым достижениям.

Желаем Вам крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и дальнейших успехов в Вашей научной деятельности. Пусть каждый новый день приносит радость от новых открытий и достижений.

*С глубоким уважением
и наилучшими пожеланиями,
Редакционный совет, Редакционная коллегия
сетевого научно-практического издания
«Эксперт: теория и практика»*



CONGRATULATIONS TO D. V. KOZLOV ON HIS ELECTION AS THE ACADEMICIAN OF RAACS

Dear Dmitry Vyacheslavovich!

We warmly congratulate you on your election as RAACS academician! This is a significant event in your scientific career, which acknowledges your enormous contribution to science and your outstanding talent.

Your professionalism, inextinguishable dedication, and commitment to new discoveries inspire many. We are confident that your experience and knowledge will continue to contribute to the development of science, and that your research will open new horizons and lead to significant achievements.

We wish you good health, unexhausted energy and further success in your scientific activities. May every new day bring joy from new discoveries and achievements.

*With deep respect
and best wishes, Editorial Board, Editorial Panel
of the network scientific-practical publication
"Expert: Theory and Practice"*



ПОЗДРАВЛЯЕМ Ю.Л. СКОЛУБОВИЧА С ИЗБРАНИЕМ АКАДЕМИКОМ РААСН



СКОЛУБОВИЧ Юрий Леонидович
академик отделения строительных наук РААСН (2026)

Доктор технических наук, профессор, кавалер ордена «Дружбы», Заслуженный эколог Российской Федерации, лауреат премии Правительства Российской Федерации в области науки и техники, Почетный работник высшего профессионального образования Российской Федерации, член Редакционного совета сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика», ректор Новосибирского государственного архитектурно-строительного университета (СИБСТРИН)

Уважаемый Юрий Леонидович !

От всей души поздравляем Вас с избранием академиком РААСН ! Этот значимый шаг в Вашей карьере – заслуженное признание Вашего огромного вклада в науку и профессиональное сообщество.

Ваши достижения и научные труды являются примером для многих, вдохновляя на новые свершения и открытия. Мы уверены, что Ваш опыт и знания будут и дальше способствовать развитию науки и приносить пользу обществу.

Желаем Вам крепкого здоровья, неиссякаемой энергии и дальнейших успехов в Вашей научной деятельности. Пусть каждый новый день приносит радость от достигнутых результатов и новые возможности для реализации самых смелых идей.

*С глубоким уважением
и наилучшими пожеланиями,
Редакционный совет, Редакционная коллегия
сетевого научно-практического издания
«Эксперт: теория и практика»*



CONGRATULATIONS TO YU. L. SKOLUBOVICH ON HIS ELECTION AS THE ACADEMICIAN OF RAACS

Dear Yuri Leonidovich!

We warmly congratulate you on your election as RAACS academician! This significant step in your career is a well-deserved recognition of your enormous contributions to science and professional community.

Your achievements and scientific works are an example to many, inspiring new achievements and discoveries. We are confident that your experience and knowledge will continue to advance science and benefit society.

We wish you good health, unexhausted energy and further success in your scientific activities. May each new day bring joy from the achievements made as well as bring new opportunities to realize the boldest ideas.

*With deep respect
and best wishes, Editorial Board, Editorial Panel
of the network scientific-practical publication
"Expert: Theory and Practice"*



ПОЗДРАВЛЯЕМ В.В. СТРОКОВУ С ИЗБРАНИЕМ ЧЛЕНОМ-КОРРЕСПОНДЕНТОМ РААСН



СТРОКОВА Валерия Валерьевна
член-корреспондент отделения строительных наук РААСН (2026)

Доктор технических наук, профессор, профессор РАН, Почётный работник высшего профессионального образования РФ, Заслуженный работник высшей школы РФ, директор инновационного научно-образовательного и опытно-промышленного центра наноструктурированных композиционных материалов (ИНО и ОПЦ НКМ), заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов (МиТМ) ФГБОУ ВО «БГТУ им. В.Г. Шухова», член редакционной коллегии сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика»

Уважаемая Валерия Валерьевна!

От всей души поздравляем Вас с почетным избранием в члены-корреспонденты отделения строительных наук РААСН (2026). Это высокое признание Ваших выдающихся достижений в научно-образовательной, инновационно-экспериментальной деятельности и неоценимого вклада в развитие отечественной строительной науки.

Ваше избрание – яркое свидетельство профессионализма, научного таланта и преданности избранному делу. Пусть этот значимый этап в Вашей

карьере станет новым импульсом для дальнейших научных открытий и достижений.

Желаем Вам неиссякаемой энергии, здоровья, женского счастья, творческого вдохновения и реализации всех намеченных планов!

*С глубоким уважением
и наилучшими пожеланиями,
Редакционный совет, Редакционная коллегия
сетевого научно-практического издания
«Эксперт: теория и практика»*



CONGRATULATIONS TO V. V. STROKOVA ON THE ELECTION AS THE CORRESPONDENT MEMBER OF RAACS

Dear Valeria Valerievna!

With all our heart, we congratulate you on the honorary election as a correspondent member of the RAACS Department of Construction Sciences (2026). This is a high recognition of your outstanding achievements in scientific and educational, innovative and experimental activities and invaluable contribution to the development of domestic construction science.

Your election is a clear indication of professionalism, scientific talent and dedication to the chosen work. May this momentous stage in your career be a new impulse for further scientific discoveries and achievements.

We wish you inexhaustible energy, health, happiness, creative inspiration, and realization of all plans!

*With deep respect
and best wishes, Editorial Board, Editorial Panel
of the network scientific-practical publication
"Expert: Theory and Practice"*



ПОЗДРАВЛЯЕМ С.М. АНПИЛОВА
С ПРИСВОЕНИЕМ ЗВАНИЯ «ПОЧЕТНЫЙ ПРОФЕССОР НГАСУ (СИБСТРИН)»



АНПИЛОВ Сергей Михайлович

Заместитель главного редактора сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика», Заслуженный изобретатель РФ, советник РААСН, Почетный строитель, доктор технических наук, Почетный профессор НГАСУ (СИБСТРИН), ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных конструкций кафедры ЖБК, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН)

Уважаемый Сергей Михайлович!

Решением Ученого совета НГАСУ (Сибстрин) звание «Почетный профессор НГАСУ (Сибстрин)» было присвоено ведущему научному сотруднику испытательного центра строительных конструкций кафедры ЖБК Сергею Михайловичу Анпилову.

Желаем Вам крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, новых творческих свершений и ярких научных открытий!

*Редакционный совет, Редакционная коллегия
редакция научно-практического сетевого издания
«Эксперт: теория и практика»*



**CONGRATULATIONS TO S.M. ANPILOV
ON CONFERRING THE TITLE OF «HONORARY PROFESSOR OF NSUACE (SIBSTRIN)»**

Dear Sergey Mikhailovich!

By the decision of the NSUACE (Sibstrin) scientific council, the title "Honorary Professor of NSUACE (Sibstrin)" was awarded to Sergei Anpilov, a leading research member at the building structures testing center of the Reinforced Concrete Structures department.

We wish you strong health, boundless energy, new creative achievements, and exciting scientific discoveries!

*Editorial Board, Editorial Staff,
Editorial Office of the Scientific Online Publication
«Expert: theory and practice»*

Научная статья

УДК 539.375.5

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.5 Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2026_2_57

ПОВЕДЕНИЕ БЕСКОНЕЧНОЙ ТОЛСТОСТЕННОЙ ТРУБЫ ИЗ ПОЛИМЕРБЕТОНА С УЧЕТОМ ИЗМЕНЕНИЯ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛА ПОД ДЕЙСТВИЕМ АГРЕССИВНОЙ СРЕДЫ

© Авторы, 2026

SPIN: 1537-7091

БАРКОВСКАЯ Светлана Владимировна

кандидат технических наук, доцент кафедры Строительство, строительные материалы и конструкции
Тульский государственный университет
(Россия, Тула, e-mail: ksv.0804@yandex.ru)

SPIN: 7522-2356

ПРОХОРОВА Алла Валерьевна

кандидат технических наук, доцент кафедры Строительство, строительные материалы и конструкции
Тульский государственный университет
(Россия, Тула, e-mail: alla_prohorowa@mail.ru)

Аннотация. В статье рассматривается изменение параметров состояния толстостенной трубы, выполненной из полимербетона. Построена математическая модель, которая описывает процесс деформации толстостенной трубы при одновременном воздействии нагрузки и диффузии агрессивной жидкости в объем материала конструкции. Проанализированы результаты расчетов.

Ключевые слова: полимербетон; свойства полимербетона; изменение механических характеристик; действие агрессивной среды; деформирование толстостенной трубы

Для цитирования: Барковская С.В., Прохорова А.В. Поведение бесконечной толстостенной трубы из полимербетона с учетом изменения свойств материала под действием агрессивной среды // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 57-60. doi:10.51608/26867818_2026_2_57.

Original article

BEHAVIOR OF ENDLESS THICK-WALLED POLYMER CONCRETE PIPE CONSIDERING THE CHANGE OF MATERIAL PROPERTIES UNDER ACTION OF AGGRESSIVE ENVIRONMENT

© The Author(s) 2026

BARCOVSKAY Svetlana Vladimirovna

Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor
of the Department of Construction, Building Materials and Structures
Tula state Universit (Russia, Tula)

PROKHOROVA Alla Valerievna

Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor
of the Department of Construction, Building Materials and Structures
Tula state Universit (Russia, Tula)

Abstract. The article discusses the change in the state parameters of a thick-walled pipe made of polymer concrete. A mathematical model was built that describes the process of deformation of a thick-walled pipe with simultaneous exposure to load and diffusion of aggressive liquid into the volume of the material of the structure. The calculation results were analyzed.

Keywords: polymer concrete; properties of polymer concrete; change in mechanical characteristics; action of aggressive environment; deformation of thick-walled pipe



For citation: Barcovskay S.V., Prokhorova A.V. Behavior of endless thick-walled polymer concrete pipe considering the change of material properties under action of aggressive environment // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 57-60. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_57.

Многие строительные конструкции и детали машин при эксплуатации взаимодействуют с агрессивными жидкостями. В этом случае надежность и долговечность элементов конструкций определяется не только прочностью, но также и их сопротивляемостью агрессивным воздействиям.

Для поддержания долговечности конструкций в условиях агрессивного воздействия среды ответственные элементы выполняют из пластических масс и композитов на их основе (полимербетонов, армополимербетонов, углепластиков и т.п.), что позволяет рационально использовать физико-химические (защитные) свойства материалов. В то же время под влиянием агрессивных сред механические свойства полимерных и композитных материалов изменяются, что следует учитывать при расчете элементов конструкций [5-7].

Федорцов А.П. и Потапов Ю.Б. проводили исследования кинетики изменения во времени прочности полимербетона при выдерживании в растворах серной кислоты и едкого натрия [5]. Они отмечают значительный рост напряжений при увеличении концентрации растворов внутри элементов.

В работе [1] Крупичка А.Г. изучалось поведение полимербетонных конструкций с учетом влажности среды. Анализ диаграмм деформирования полимербетона ФАМ после выдержки образцов в течение различного времени в средах разной влажности показал, что воздействие агрессивной среды приводит к изменению характера разномодульности [1].

Поведение полимербетона в условиях агрессивного воздействия внешней среды предлагаем описать с помощью соотношений, полученных Овчинниковым И.Г., Петровым В.В. и Гарбузом Е.В. [2 – 4]. Считаем, что изменение концентрации агрессивной жидкости в объеме полимербетонной оболочки происходит по законам активной диффузии и описывается уравнением [3]

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \cdot \Delta C, \quad (1)$$

где $\Delta = \partial^2 / \partial x^2 + \partial^2 / \partial y^2 + \partial^2 / \partial z^2$ - оператор Лапласа, имеющий в цилиндрических координатах r, θ, z следующий вид:

$$\Delta = \frac{\partial^2}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} + \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2},$$

C - концентрация агрессивной среды, t - текущее время, $D = 1,39 \cdot 10^{-5} \text{ см}^2/\text{с}$ - коэффициента диффузии для полимербетона.

В полярной системе координат при радиальной симметрии уравнение активной диффузии принимает вид

$$C_{,t} = D \cdot C_{,rr} + \frac{D}{r} C_{,r}, \quad (2)$$

где r - радиальная координата.

Полагаем, что материал трубы является нелинейно-упругим, а характер его диаграммы деформирования зависит от концентрации C :

$$\sigma_i = \Phi(\varepsilon_i, C), \quad (3)$$

где σ_i, ε_i - интенсивности напряжений и деформаций.

В результате анализа экспериментальных кривых деформирования полимербетонных конструкций с учетом разного уровня концентрации агрессивной среды установлено, что их можно аппроксимировать функцией

$$\sigma_i = E(C) \varepsilon_i - m(C) \varepsilon_i^n, \quad (4)$$

где $E(C) = (184 - 57C) \cdot 10^2$ (в МПа); $m(C) = (1,5 - 1,05C) \cdot 10^8$ (в МПа); $n = 3$ [3].

Агрессивная среда при взаимодействии с полимербетоном изменяет его механические свойства, это значит, что напряженно-деформированное состояние материала будет зависеть от концентрации C . Учесть изменение свойств материала трубы можно, используя соотношения между компонентами тензоров напряжений и деформаций, аналогично принятым в работах [3-4]:

$$\varepsilon_k = [\sigma_k - \nu(\sigma_m + \sigma_j)] / \psi; \quad (5)$$

где $k, m, j = 1, 2, 3$; σ_k - главные напряжения; ε_k - соответствующие им деформации; $\psi = \sigma_i / \varepsilon_i$ - функция интенсивности деформаций и концентрации среды; ν - коэффициент поперечной деформации, определяемый выражением $\nu(C) = 0,5 - \psi(1 - 2\nu_0) / 2E(C)$, $\nu_0 = 0,25$ [3].

Рассмотрим равновесие бесконечной толсто-стенной трубы из полимербетона, внутренний радиус которой R_1 , а внешний R_2 (рис. 1). Обо-

лочка может находиться под действием внутреннего давления P_1 и внешней растягивающей нагрузки P_2 .

В цилиндрической системе координат r, θ, z , ось z которой совпадает с осью вращения цилиндра, функции, характеризующие напряженное состояние, будут зависеть только от радиальной координаты r . Для отличных от нуля компонентов тензора деформаций имеем:

$$\varepsilon_r = \frac{du}{dr}; \quad \varepsilon_\theta = \frac{u}{r}. \quad (6)$$

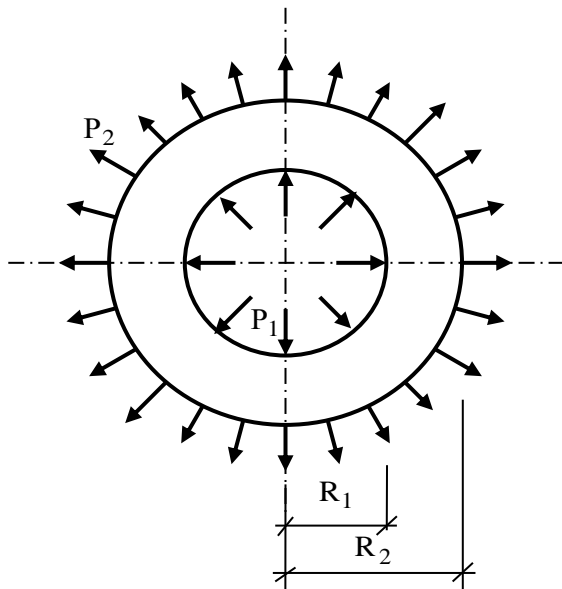


Рис. 1. Поперечное сечение толстостенной трубы

Уравнения состояния в случае плоской деформации в полярных координатах имеют вид

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= [\sigma_r - \nu(\sigma_\theta + \sigma_z)] / \psi; \\ \varepsilon_\theta &= [\sigma_\theta - \nu(\sigma_r + \sigma_z)] / \psi; \\ \varepsilon_z &= [\sigma_z - \nu(\sigma_\theta + \sigma_r)] / \psi, \end{aligned} \quad (7)$$

где функции ψ и ν определяются зависимостями [5]

$$\begin{aligned} \psi &= \sigma_i / \varepsilon_i; \\ \nu(C) &= 0,5 - \psi(1 - 2\nu_0) / 2E, \\ \nu_0 &= 0,25. \end{aligned} \quad (8)$$

Изменение концентрации агрессивной жидкости в теле оболочки с течением времени определяется выражениями (9)-(10), которые являются решением дифференциального уравнения (2)

$$C(r, t) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\Psi_k(\gamma_k, r/R_2)}{\Psi_k} \times$$

$$\times K_0 \exp(-\gamma_k^2 \frac{Dt}{R_2^2}), \quad (9)$$

где функция $\Psi_k(\gamma_k, r/R_2)$ зависит от направления воздействия агрессивной среды, для случая, когда агрессивная среда находится внутри трубы

$$\Psi_k(\gamma_k, r/R_2) = Y_0(\gamma_k R_1/R_2) J_0(\gamma_k r/R_2) - J_0(\gamma_k R_1/R_2) Y_0(\gamma_k r/R_2); \quad (10)$$

граничные условия при этом

$$\begin{aligned} C(r = R_1) &= 1; \quad \partial C / \partial r (r = R_2) = 0; \\ C(t = 0) &= 0. \end{aligned} \quad (11)$$

Уравнения равновесия и неразрывности деформаций для данной задачи определяются выражениями:

$$\begin{aligned} \sigma_{r,r} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} &= 0, \\ \varepsilon_{\theta,r} &= \frac{\varepsilon_r - \varepsilon_\theta}{r} \end{aligned} \quad (12)$$

Разрешающее уравнение составим относительно σ_r

$$\sigma_{r,rr} + T\sigma_{r,r} + F\sigma_r = 0, \quad (13)$$

где коэффициенты T и F соотношениями

$$\begin{aligned} T &= \frac{3}{r} - \frac{2\nu\nu_{,r}}{1-\nu^2} - \frac{\psi_{,r}}{\psi}; \\ F &= -\frac{1}{r(1-\nu^2)} \times \\ &\times \left[\nu_{,r}(1+4\nu) + \frac{\psi_{,r}}{\psi}(1-\nu-2\nu^2) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Решение задачи построено на основе метода пошаговых нагружений в сочетании с итерационной процедурой "переменных параметров упругости", также используется конечно-разностная аппроксимация повышенной точности. В результате разностной аппроксимации разрешающего дифференциального уравнения (13) и граничных условий (11) была получена система линейных алгебраических уравнений относительно σ_{ri} . Для первого приближения используется линейное решение.

Сформированная система линейных алгебраических уравнений решается методом Гаусса. В ходе решения поэтапно фиксируется распределение деформаций и напряжений по толщине оболочки. Критериями завершения решения задачи считается выполнение одного из условий:

– достижение заданной величины нагрузки,



- достижение предельных значений напряжений или деформаций,
- образование трещин при соблюдении неравенства

$$\sigma_{\theta}^{pb} \geq R_{pb t}, \quad (15)$$

где σ_{θ}^{pb} - растягивающее напряжение, рассчитанное для центра фиктивного полимербетонного слоя; $R_{pb t}$ - предел прочности полимербетона на осевое растяжение.

В среде MATLAB была подготовлена программа для выполнения расчетов, учитывался шаг по нагрузке около 0,1-1% от предела прочности полимербетона на растяжение, шаг по времени – 4 часа, $R_1 = 0,5$ м, $R_2 = 0,7$ м, с разбиением стенки на 300 отрезков. Процесс деформирования оболочки рассматривался при одновременном увеличении нагрузки и времени действия агрессивной жидкости.

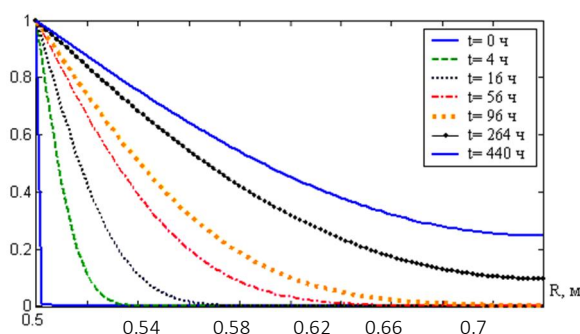


Рис. 2. Изменение распределения концентрации агрессивной жидкости по толщине полимербетонного слоя в разные моменты времени, где C_0 - концентрация агрессивной среды внутри оболочки

В начальный период времени (порядка 20 часов) заметна существенная неравномерность распределения концентрации агрессивной среды по толщине (рис. 2). В результате образуется неоднородность механических свойств материала, что отражается на характере напряженного состояния оболочки. С течением времени концентрация коррозионной среды выравнивается по толщине трубы, происходит перераспределение напряжений, и напря-

женное состояние трубы приближается к исходному. При этом в середине слоя появляется зона максимальных напряжений, что вызывает образование трещин именно в этой области.

Анализ полученных результатов показывает, что проникновение агрессивной жидкости в объем конструкции вызывает размягчение материала и увеличение податливости. При данной скорости квазистатического нагружения срок службы конструкции до ее выбраковки удлинится более чем на 100 часов, так как в поверхностных слоях, где концентрация агрессивной жидкости максимальна, уровень напряжений снижается на 35-40%. Эти факторы приводят к тому, что трещины образуются при нагрузке, которая на 41,3% превышает нагрузку трещинообразования для полимербетона в исходном состоянии.

Библиографический список

1. Крупичка А. Г. Исследование полимербетонных конструкций с учетом влажности среды. – Автореф. дис. – М.: МИИТ, 1980. – 21 с
2. Овчинников И.Г., Кириллова Л.А. Учет влияния водородосодержащей среды на деформирование гибких круглых пластин. – Саратов, 1988. – 9 с. – Рукопись представлена Саратов. политехн. ин-том. Деп. В ВИНТИ 8 августа 1988, № 6339-888.
3. Овчинников И.Г., Гарбуз Е.В. Влияние кинетики диффузии агрессивной жидкости на напряженное состояние толстостенной оболочки // Изв. вузов. Строительство и архитектура, 1987. - № 6. – С. 31 – 34.
4. Петров В.В., Иноземцев В.К., Овчинников И.Г. Деформирование элементов конструкций из нелинейно разномодульного неоднородного материала. – Саратов: СГУ, 1988. – 160 с.
5. Федорцов А.П., Потапов Ю.Б. Физико-химическая стойкость полимербетонных композитов в агрессивных средах // Композиционные материалы и конструкции для сельскохозяйственного строительства. – Саранск, 1980. – С. 87-96.
6. Фрегер Г.Е., Цой Н.Г. Влияние агрессивных сред на прочностные и упругие свойства стеклопластиков, изготовленных в вакууме // Физико-химическая механика материалов. – 1974. - № 5. – С. 77-79.
7. Харин В.С. Оценка прочности металлических элементов машин и конструкций в условиях воздействия водородосодержащих сред // Механика конструкций, работающих при воздействии агрессивных сред / Саратов. политехн. ин-т. – Саратов. – 1987. – С. 20 – 24.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 01.03.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 01.03.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 69.059.32

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.5 Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2026_2_61

УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ЭКСПЛУАТИРУЕМЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ

© Авторы, 2026

SPIN: 1859-3141

БЕДОВ Анатолий Иванович

кандидат технических наук, профессор

Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

(Россия, Москва, e-mail: BedovAI@mgsu.ru)

SPIN: 8911-0460

ЛАСЬКОВ Николай Николаевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций

Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(Россия, Пенза)

SPIN: 9067-9157

ГАБИТОВ Азат Исмагилович

доктор технических наук, профессор

Уфимский государственный нефтяной технический университет
(Россия, Уфа)

SPIN: 1699-4630

НЕДОСЕКО Игорь Вадимович

доктор технических наук, профессор

Уфимский государственный нефтяной технический университет
(Россия, Уфа)

SPIN: 5759-8923

САЛОВ Александр Сергеевич

кандидат технических наук, доцент

Уфимский государственный нефтяной технический университет
(Россия, Уфа)

Аннотация. В статье представлены основные положения по разработке проекта восстановления или усиления железобетонных конструкций. Усиленные конструкции рассчитывают по предельным состояниям первой и второй групп, при этом расчёт усиливаемых конструкций производится для двух стадий работы – до включения в работу и после включения в работу элементов усиления. Рассмотрены требования к методам усиления железобетонных конструкций. Предложена классификация методов восстановления и усиления железобетонных конструкций по способу их реализации. Показано, что расчёт усиленных железобетонных элементов по прочности должен производиться для сечений, нормальных к их продольной оси, а также для наклонных к ней сечений наиболее опасного направления; при наличии крутящих моментов следует проверять прочность пространственных сечений, ограниченных в растянутой зоне спиральной трещиной наиболее опасного из возможных направлений. Кроме того, должен производиться расчёт элементов на местное действие нагрузки (смятие, продавливание, отрыв). Изложена подробная методика расчёта усиленных изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций.

Ключевые слова: усиление; железобетон; дефект; повреждение; расчет; прочность

Для цитирования: Усиление железобетонных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений / А.И. Бедов, Н.Н. Ласьков, А.И. Габитов, И.В. Недосеко, А.С. Салов // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 61-68. doi:10.51608/26867818_2026_2_61.



Original article

STRENGTHENING OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES OF BUILDINGS AND STRUCTURES IN USE

© The Author(s) 2026

BEDOV Anatoly Ivanovich

Candidate of Sciences (Technical), Professor
*National Research Moscow State University of Civil Engineering
(Russia, Moscow)*

LASKOV Nikolay Nikolaevich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
*Penza State University of Architecture and Construction
(Russia, Penza)*

GABITOV Azat Ismagilovich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
*Ufa State Petroleum Technological University
(Russia, Ufa)*

NEDOSEKO Igor Vadimovich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
*Ufa State Petroleum Technological University
(Russia, Ufa)*

SALOV Alexander Sergeevich

Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor
*Ufa State Petroleum Technological University
(Russia, Ufa)*

Abstract. Main provisions on the development of the project for refurbishment or strengthening of concrete structures are presented in the article. Reinforced structures are calculated according to the ultimate limit state and service limit state, with the calculation of the structures being strengthened in two operating steps - before and after the strengthening elements are included therein. The requirements for the methods of strengthening concrete structures are considered. Classification of methods for refurbishment and strengthening of reinforced concrete structures by the method of their implementation is proposed. The structural analysis of strengthened concrete elements is shown to be made for the sections normal to their longitudinal axis, as well as for the sections inclined thereto of the most critical direction; if there are torque moments, the strength of spatial sections limited in the tension side by a spiral crack of the most critical direction should be checked. The elements should also be calculated for local loads (crushing, pushing, and tearing). The detailed procedure for calculating strengthened bending and eccentrically compressed structures is presented.

Keywords: reinforcement; reinforced concrete; structural defect; construction damage; calculation; strength

For citation: Strengthening of reinforced concrete structures of buildings and structures in use / A. I. Bedov, N.N. Laskov, A.I. Gabitov, I.V. Nedoseko, A. S. Salov // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 61-68. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_61.

Введение. Разработку проекта восстановления или усиления железобетонных конструкций следует производить в соответствии с требованиями СП 52-110-2009 «Бетонные и железобетонные конструкции, подвергающиеся технологическим повышенным и высоким температурам», СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции Основные положения», СП 164.13255800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования», СП 52-103-2007 «Железобетонные монолитные конструкции зданий», СП 52-104-2006*

«Сталефибробетонные конструкции», СП 52-117-2008* «Железобетонные пространственные конструкции покрытий и перекрытий. Методы расчета и конструирования», СП 52-105-2009 «Железобетонные конструкции в холодном климате и на вечномерзлых грунтах», СП 27.13330.2017 «СНиП 2.03.04-84. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур», СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования».



Усиленные конструкции рассчитывают по предельным состояниям первой и второй групп. Если усиление является следствием дефектов и повреждений конструкций, то расчёт по предельным состояниям второй группы для обычных конструкций и обычных условий их эксплуатации не требуется [1-3], его необходимо выполнять лишь для специальных конструкций и в особых условиях эксплуатации (например, при усилении резервуаров, эксплуатации в агрессивной среде и т.д.).

Расчёт усиленных элементов железобетонных конструкций при изменении их начальной статической схемы и напряжённого состояния производится согласно новой статической схеме с учётом действительного напряжённого состояния.

Усиливаемые предварительно напряжённые конструкции должны проверяться на совместное действие усилий обжатия арматуры усиления, собственной предварительно напряжённой арматуры и внешней нагрузки, действующей при осуществлении усиления.

Усилия, действующие в элементах статически неопределимых конструкций следует определять с учётом возможного их перераспределения исходя из допустимой ширины раскрытия трещин и прочности сжатой зоны, в частности в сильно армированных сечениях, а в необходимых, когда требуется выполнение расчёта по второй группе предельных состояний, также исходя из деформативности и трещиностойкости [4-9].

При значительных повреждениях конструкций (при разрушении не менее 50 % сечения элемента или снижении площади сечения рабочей арматуры не менее 50 %) конструкции усиления рассчитывают на полную действующую нагрузку, при этом усиливаемая конструкция в расчёте не учитывается.

При приварке к существующей арматуре дополнительных стержней её сечение в связи с возможностью повреждения пережогом при сварке принимается ослабленным на 25 %.

При определении площади поперечного сечения арматуры усиливаемой конструкции следует учитывать возможное её уменьшение в результате коррозии (особенно язвенной).

При обнаружении следов коррозии арматуры из высокопрочной проволоки конструкцию следует усиливать на полную нагрузку, без учёта сопротивления этой арматуры.

Расчёт усиливаемых конструкций производится для двух стадий работы:

- до включения в работу усиления – на нагрузки, действующие на момент усиления, включающие нагрузку от элементов усиления;
- после включения в работу элементов усиления на полные эксплуатационные нагрузки.

Усиливаемые конструкции до включения в работу усиления должны отвечать требованиям по несущей способности (предельные состояния первой группы), а после усиления, кроме этого и по эксплуатационной пригодности и долговечности (предельные состояния второй группы).

При проектировании усиления расчёту подлежат усиливаемый элемент с элементами усиления, а также конструкции или элементы конструкций, на которые могут передаваться усилия от элементов усиления [2; 10].

Модели и методы. Методы усиления конструкций должны удовлетворять требованиям технологичности и экономичности. Следует стремиться к выполнению работ по усилению без или с кратковременной остановкой производства с учётом агрессивности внешней среды и степени огнестойкости помещений. На стадии проектирования усиления следует также предусматривать обеспечение включения в совместную работу элементов усиления с усиливаемой конструкцией. Если усиление предполагается производить после разгрузки усиливаемой конструкции, то загрузка её заново осуществляется только после достижения бетоном усиления проектной прочности.

Методика расчёта усиленных изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций приемлема только при условии обеспечения надёжного соединения усиливаемых и усиливающих частей [11-12]. В том числе следует обеспечивать совместность работы старого и нового бетона конструктивными мероприятиями, например установкой специальной дополнительной арматуры.

Расчёт усиленных железобетонных элементов по прочности должен производиться для сечений, нормальных к их продольной оси, а также для наклонных к ней сечений наиболее опасного направления; при наличии крутящих моментов следует проверять прочность пространственных сечений, ограниченных в растянутой зоне спиральной трещиной наиболее опасного из возможных направлений. Кроме того, должен производиться расчёт элементов на местное действие нагрузки (смятие, продавливание, отрыв).

При наличии в сечении элемента, усиленного обоймой, рубашкой или наращиванием, арматуры разных видов, а также различных классов бетона, каждый вид арматуры и класс бетона вводят в расчёт со своим расчётным сопротивлением.

Расчётное сопротивление арматуры и бетона усиления принимается с учётом коэффициентов условий работы конструкций γ_{bi} и γ_{si} , а также с учётом рекомендаций, приведённых ниже.

Результаты исследования и их анализ. Усиление конструкций железобетонными обоймами, "рубашками" и наращиванием рекомендуется выпол-



нять под нагрузкой, не превышающей 65 % расчётной. При сложности или невозможности достижения требуемой степени разгрузки допускается выполнение усиления под большей нагрузкой.

При определении расчётных характеристик бетона и арматуры усиления принимаются дополнительные коэффициенты: в первом случае – $\gamma_{br0} = 1$ и $\gamma_{sr0} = 1$, во втором – $\gamma_{br0} = 0,8$ и $\gamma_{sr0} = 0,8$.

В любом случае степень разгрузки конструкций должна гарантировать безопасное выполнение работ по усилению, если такие работы ведутся без устройства дополнительных опор, подпорок и т.п.

При наличии повреждений, снижающих несущую способность по растянутой арматуре, степень использования в расчёте существующей арматуры определяется в зависимости от вида и характера повреждений [13].

Положение центра тяжести всего сечения бетона или сжатой зоны, а также статические моменты бетона и арматуры рекомендуется определять, приводя всё сечение к бетону одного класса, в соответствии с принятыми расчётными сопротивлениями.

В расчётах следует учитывать величину обмятия элементов и конструкций в местах их сопряжения. В частности, для сопряжений бетона с металлом податливость одного узла при отсутствии экспериментальной проверки может приниматься в следующих пределах: металлический упор на бетон с раствором – 3-4 мм/узел; без раствора – 4-5 мм/узел (желательно не допускать); металлический карман с раствором – 1-3 мм/узел; обмятие сопряжения металла с металлом с помощью болтов – 1 мм/узел.

Расчёт железобетонных изгибаемых элементов, усиленных обоями, "рубашками" и наращиванием, выполняется как для монолитных. При этом различные повреждения в усиливаемой конструкции (коррозия арматуры, расслоение бетона и др.) учитываются так же, как и при расчёте конструкции до усиления [14-16]. В связи с тем, что усиленный элемент может иметь в одном сечении различные классы бетона и арматуры, расчёт изгибаемых элементов по прочности нормальных сечений должен производиться по общему случаю расчёта железобетонных конструкций.

При наличии двойной арматуры как в существующей конструкции, так и в элементах усиления нормальные сечения изгибаемого элемента, нагруженного внешней силой, расположенной в плоскости оси симметрии, возможно рассчитывать в зависимости от соотношения фактической величины относительной высоты сжатой зоны бетона ξ и её граничного значения ξ_R .

При подсчёте ξ_R принимается, что предельное состояние в конструкции достигается одновре-

менно с достижением в растянутой арматуре расчётного сопротивления, но без учёта коэффициента γ_{s3} .

При определении ξ рабочая высота сечения $h_{0,red}$ принимается равной сумме расстояния от сжатой грани сечения до центра тяжести существующей растянутой арматуры h_0 и расстояния от центра тяжести существующей арматуры до центра тяжести арматуры усиления a_{red} . В случае расположения в сжатой зоне бетона разных классов при определении ξ и ξ_R в расчётах принимается расчётное сопротивление бетона более низкого класса [5,16-18]. При различных классах арматуры в существующей конструкции и элементах усиления их расстояние от центра тяжести определяется с использованием приведённой площади сечения:

$$A_{s,red} = A_s + \frac{R_{s,ad}}{R_s} A_{s,ad}; \quad (1)$$

$$A'_{s,red} = A'_s + \frac{R_{sc,ad}}{R_{sc}} A'_{s,ad}, \quad (2)$$

где $A_{s,red}$ и $A'_{s,red}$ – приведённая площадь сечения растянутой и сжатой арматуры; A_s и A'_s – площади растянутой и сжатой арматуры существующей конструкции; $A_{s,ad}$ и $A'_{s,ad}$ – то же, элементов усиления; R_s и $R_{s,ad}$ – расчётные сопротивления растяжению существующей арматуры и стержней усиления; R_{sc} и $R_{sc,ad}$ – то же, сжатию. При этом

$$a_{red} = \frac{R_{s,ad} A_{s,ad} (h_{0,ad} - h_0)}{R_s A_s + R_{s,ad} A_{s,ad}}, \quad (3)$$

где $h_{0,ad}$ – расстояние от сжатой грани усиленного элемента до центра тяжести растянутой арматуры элемента усиления (рис. 1).

Относительная высота сжатой зоны

$$\xi = \frac{R_s A_{s,red} - R_{sc} A'_{s,red}}{R_b b h_{0,red}}, \quad (4)$$

где $h_{0,red} = h_0 + a_{red}$ – приведенное расстояние от сжатой грани усиленного элемента до общего центра тяжести; b – ширина усиленного элемента.

Расчёт прочности усиленного сечения:

$$M \leq R_{b,red} b x (h_{0,red} - 0,5x) + R_{sc} A'_{sc,red} (h_{0,red} - a'), \quad (5)$$

где x – высота сжатой зоны бетона; a' – расстояние от сжатой грани бетона усиленного элемента до центра тяжести сжатой арматуры усиления.

$$A = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_{sc,red} - R_{b,red} b h_{0,red}}{0,5 R_{t,ad}}; \quad (9)$$

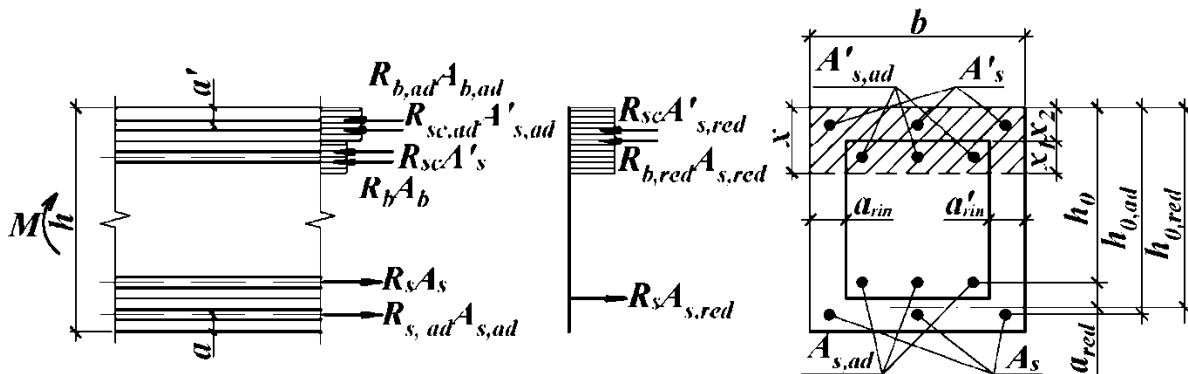


Рис. 1. Расчётная схема при усилении обоймой

Приведённое расчётное сопротивление сжатой зоны бетона

$$R_{b,red} = \frac{R_b A_b + R_{b,ad} A_{b,ad}}{A_{b,tot}}, \quad (6)$$

где R_b – расчётное сопротивление бетона существующей конструкции при сжатии; $R_{b,ad}$ – то же, элементов усиления; A_b – площадь сжатой зоны усиливаемого элемента; $A_{b,ad}$ – то же, усиливающего элемента; $A_{b,tot} = A_b + A_{b,ad}$ – суммарная площадь сечения сжатой зоны усиленного элемента.

Полная высота сжатой зоны бетона составляет $x = x_1 + x_2$, где x_1 – высота сжатой зоны бетона, которая находится в усиливаемом элементе; x_2 – то же, в усиливающем. Соответственно площади бетона составляют $A_b = [b - (a_{rin} + a'_{rin})] x_1$; $A_{b,ad} = bx - A_b$, где a_{rin} и a'_{rin} – ширина обоймы наращивания.

Если сжатая зона находится в пределах бетона усиления, $R_{b,red}$ принимают равным $R_{b,ad}$ и уточняют новую высоту сжатой зоны бетона.

Высота сжатой зоны бетона

$$x = \frac{R_s A_{s,red} + R_{sc} A'_{s,red}}{R_{b,red} b}. \quad (7)$$

Необходимую площадь дополнительной растянутой арматуры определяют из совместного решения уравнений (5) и (7) по формуле

$$A_{s,ad} = -0,5A \pm \sqrt{0,25A^2 - B}, \quad (8)$$

где

$$B = \frac{2(M + R_{sc} A'_{s,red} a' - R_s A_s h_{0,red}) R_{b,red} b (R_s A_s - R_{sc} A_{sc})^2}{R_{s,ad}^2} \quad (10)$$

При отсутствии сжатой арматуры в существующей конструкции и элементе усиления:

$$A = \frac{R_s A_s - R_{b,red} b h_{0,red}}{0,5 R_{s,ad}}; \quad (11)$$

$$B = \frac{2(M - R_s A_s h_{0,red}) R_{b,red} b + R_s^2 A_s^2}{R_{s,ad}^2}; \quad (12)$$

$$x = \frac{R_s A_s + R_{s,ad} A_{s,ad}}{R_{b,red} b}. \quad (13)$$

Как и обычные железобетонные изгибаемые элементы, усиливаемые конструкции рекомендуется проектировать при соблюдении условия $x \leq \xi_R h_{0,red}$. Если площадь растянутой арматуры по конструктивным соображениям или по расчёту принята большей и $x > \xi_R h_{0,red}$, то допускается производить расчёт по формуле (3.5), вычислив высоту сжатой зоны по формуле

$$x = \frac{\sigma_{s,ad} A_{s,ad} + \sigma_s A_s - R_{sc} A'_{s,red}}{R_{b,red} b}, \quad (14)$$

где

$$\sigma_s = \frac{0,2 + \xi_R}{0,2 + \xi + 0,35 \frac{\sigma_{sp}}{R_s} \left(1 - \frac{\xi}{\xi_R}\right)}; \quad (15)$$



$$\sigma_{s,ad} = \frac{0,2 + \xi_R}{0,2 + \xi + 0,35 \frac{\sigma_{sp}}{R_{s,red}} \left(1 - \frac{\xi}{\xi_R}\right)} \quad (16)$$

из условия, чтобы площадь имеющейся растянутой арматуры была достаточна для восприятия максимального момента [19]. При одностороннем расположении арматуры только в растянутой зоне

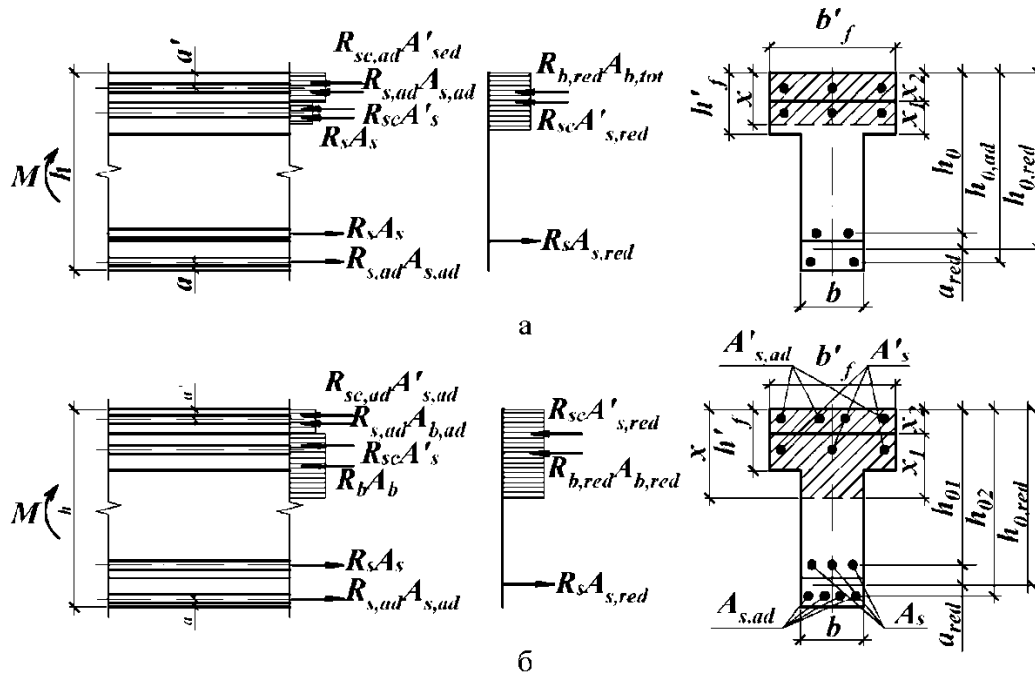


Рис. 2. Схема усилий и эпюра напряжений в сечении, нормальном к продольной оси изгибаемого элемента, усиленного двусторонним наращиванием, при расчёте его на прочность: а – при расположении сжатой зоны в полке; б – то же, в ребре

σ_{sp} – предварительное напряжение в арматуре до обжатия бетона (при натяжении на упоры) или в момент снижения напряжения обжатия в бетоне под воздействием внешних фактических или условных сил [18]. Величина σ_{sp} определяется при $\gamma_{sp} > 0$. При отсутствии предварительного напряжения в формулах (15), (16) третье слагаемое в знаменателе отсутствует. При вычислении σ_s и $\sigma_{s,ad}$ значения ξ и ξ_R определяют по тому классу бетона, в котором расположена соответствующая арматура.

Дополнительную растянутую арматуру определяют в этом случае также по формуле (8) при следующих значениях А и В:

$$A = \frac{\sigma_s A_s - R_{sc} A'_{s,red} - R_{b,red} b h_{0,red}}{0,5 \sigma_{s,ad}}; \quad (17)$$

$$B = \frac{2(M + R_{sc} A'_{s,red} a' - \sigma_s A_s h_{0,red}) R_{b,red} b + (\sigma_s A_s - R_{s,red} A_s)^2}{\sigma_{s,ad}^2} \quad (18)$$

При усилении изгибаемых элементов прямоугольного и таврового сечения наращиванием только сверху высоту наращивания x_2 определяют

$$x_2 = \frac{M}{R_s A_s} - h_0 + 0,5x, \quad (19)$$

где

$$x = \frac{R_s A_s}{R_{b,red} b}. \quad (20)$$

Если высота сжатой зоны бетона меньше высоты наращивания, $R_{b,red}$ в формуле (20) принимается равным $R_{b,ad}$; если больше, то $R_{b,red}$ определяется по формуле (6).

При усилении тавровых железобетонных сечений наращиванием снизу и сверху расчёт при соблюдении условия $\xi < \xi_R$ производят в зависимости от положения границы сжатой зоны (рис. 2).

При прохождении нейтральной оси в полке, т.е. при

$$R_s A_{s,red} \leq R_{b,red} b'_f h'_f + R_{sc} A'_{s,red}, \quad (21)$$

расчёт производят как для элемента прямоугольного сечения шириной b'_f . При расположении границы сжатой зоны в ребре расчёт прочности производят по формуле



$$M \leq R_{b,red} b x (h_{0,red} - 0,5x) + R_{b,red} h'_f (b'_f - b) (h_{0,red} - 0,5h'_f) + R_{sc} A'_{s,red} (h_{0,red} - a'), \quad (22)$$

где

$$x = \frac{R_s A_s - R_{b,red} h'_f (b'_f - b) - R_{sc} A'_{s,red}}{R_{b,red} b}, \quad (23)$$

$A_{s,red}$ и $A'_{s,red}$ определяют по формулам (1) и (2); $R_{b,red}$ – по формуле (6).

Площадь дополнительной арматуры определяют по формуле (8), где

$$A = \frac{R_s A_s - R_{sc} A'_{s,red} - R_{b,red} [bh_{0,red} + h'_f (b'_f - b)]}{0,5R_{s,ad}}, \quad (24)$$

$$B = \frac{(R_s A_s - R_{sc} A'_{s,red})^2 + [R_{b,red} h'_f (b'_f - b)]^2}{R_{s,ad}^2} + \frac{2R_{b,red} b [M - R_s A_s h_{0,red} + R_{sc} A'_{s,red} a' + R_{b,red} h'^2_f (b'_f - b)]}{R_{s,ad}^2} - \frac{2R_{b,red} h'_f (R_s A_s - R_{sc} A'_{s,red}) (b'_f - b)}{R_{s,ad}^2}; \quad (25)$$

Выводы. Усиленные элементы железобетонных конструкций рассчитывают по предельным состояниям первой и второй групп, при этом расчёт изгибаемых элементов по прочности нормальных сечений производится по общему случаю расчёта железобетонных конструкций [20-22]. Рассмотренные методики расчета могут быть полезны проектным организациям и строительным компаниям при выполнении работ по реконструкции существующих зданий и сооружений. В дальнейшем предполагается проведение дополнительных исследований, направленных на совершенствование методов расчета усиления железобетонных конструкций с применением современных программных комплексов.

Библиографический список

1. Гарькина И.А., Данилов А.М. Опыт проектирования композитов: ретроспективный анализ // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 2 (59). С. 22-29.
2. A.I. Gabitov, V.A. Ryazanova, A.S. Salov, A.M. Gaisin, A.A. Timofeev. Manufacture of construction materials by energy-saving technology through the example of the Bashkir region // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Volume 907, Issue 1, 25 August 2020, Номер статьи 012049.

3. A.I. Gabitov, E.A. Udalova, A.S. Salov, A.R. Chernova. Outlook in Making Criteria for Assessing Progressive Collapse of Buildings and Facilities // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2019. Volume 753, Issue 2, 5 March 2020, Номер статьи 022085.

4. Габитов А.И., Семенов А.А. Железобетонные конструкции. Курсовое и дипломное проектирование с использованием программного комплекса SCAD // Учебное пособие. – М.: Изд-во САД СОФТ, Издательство АСВ, 2011. – 280 с.

5. Будадылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Основы качественной и количественной оценки качества сложных систем иерархической структуры // Региональная архитектура и строительство. 2021. № 1 (46). С. 77-85.

6. Бедов А.И., Бабков В.В., Габитов А.И., Салов А.С. Использование бетонов и арматуры повышенной прочности в проектировании сборных и монолитных железобетонных конструкций // Вестник МГСУ. 2012. № 8. С. 76-84.

7. Мирсаяпов И.Т., Гайнетдинов Р.Г., Салимзянов И.Р. Узлы сопряжения железобетонных колонн с фундаментами // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 2 (68). С. 124-135.

8. Бедов А.И., Знаменский В.В., Габитов А.И. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Часть 1. Обследование и оценка технического состояния оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений // Изд-во АСВ, 2023 (2021, 2014, 2016) 704 с.

9. Бедов А.И., Габитов А.И., Знаменский В.В. Оценка технического состояния, восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. В 2-х частях. Ч. II. Восстановление и усиление оснований и строительных конструкций эксплуатируемых зданий и сооружений. Под ред. А.И. Бедова: Учеб. пос. // М: АСВ, 2023 (2021, 2017) 924 с.

10. Сулейманов А.М., Шакиров А.Р. Экспериментальное исследование напряженно-деформированного состояния железобетонных балок, усиленных углепластиком // Строительные материалы. 2023. № 4. С. 10-17.

11. Будадылина Е.А., Гарькина И.А., Данилов А.М. Идентификация и современные парадигмы в материаловедении // Региональная архитектура и строительство. 2024. № 4 (61). С. 24-28.

12. Бабков В.В., Салов А.С., Плакс А.А., Колесник Г.С., Сахибгареев Р.Р. Вопросы эффективности применения высокопрочных бетонов в железобетонных конструкциях // Жилищное строительство. 2009. № 10. С. 43.

13. Иноземцев С.С., До Т.Ч., Королев Е.В. Отечественный опыт исследования в области строительных материалов с функцией самовосстановления // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2022. № 1. С. 8-22.

14. Bedov A., Salov A., Gabitov A. Cad methods of structural solutions for reinforced concrete frame // XXI International Scientific Conference on Advanced in Civil Engineering "Construction - The Formation of Living Environment" (FORM 2018), Moscow, Russian Federation. Volume 365, 2018, Pages 1-8.

15. Королев Е.В., Беленцов Ю.А. Применение теории информации в решении задач строительного матери-



аловедения // Региональная архитектура и строительство. 2023. № 3 (56). С. 13-28..

16. Айзатуллин М.М., Сабитов Л.С., Гарькина И.А., Киямов И.К., Сайфетдинова М.К. Цифровое моделирование и сапр в определении напряженно-деформированного состояния сооружений // Научно-технический вестник Поволжья. 2024. № 9. С. 11-14.

17. Модель прогрессирующего разрушения системы "балка-основание" Поддубный А.А., Гордон В.А., Семенов Г.А. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2024. № 2 (364). С. 3-11.

18. Динамика конструктивно нелинейной системы "балка - основание" при внезапном образовании трещин Поддубный А.А., Гордон В.А. Вестник Белорусского государственного университета транспорта: наука и транспорт. 2022. № 1 (44). С. 84-87.

19. Оценка жесткости усиленных деревянных балок с переменной жесткостью и толщиной соединительного шва Гвозков П.А., Деревенец В.С., Коробко В.И. В сборнике: БЕЗОПАСНЫЙ И КОМФОРТНЫЙ ГОРОД. Сборник научных трудов по материалам всероссийской научно-практической конференции. 2018. С. 91-97.

20. Оценка жесткости балок при обследовании зданий текстильной промышленности вибрационными методами Коробко В.И., Калашников М.О., Бухтиярова А.С. Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2016. № 3 (363). С. 270-275.

21. Бикташева А.Р., Мухамедзянов Р.Р., Салов А.С., Удалова Е.А., Габитов А.И. Развитие методов усиления и восстановления объектов инфраструктуры нефтепереработки и нефтехимии // История и педагогика естествознания. 2023. № 1. С. 15-33

22. Gabitov A., Salov A., Yudin A. The application of steel-reinforced concrete floors in the reconstruction of the petrochemical complex enterprises // AIP Conference Proceedings, 2023, 2910(1), 020180.

23. Гарькина И.А., Гарькин И.Н., Сазонова М.А. Техническая экспертиза: обоснование проведения противоаварийных работ на объекте культурного наследия // Моделирование и механика конструкций. 2024. № 19. С. 114-122.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 17.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 17.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 69.059.7

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.5 Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2026_2_69

ВЫБОР ОПТИМАЛЬНОГО ВАРИАНТА РЕКОНСТРУКЦИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ АРМИРОВАННЫХ БАЗАЛЬТОВЫМ ВОЛОКНОМ БЕТОННЫХ ПЛИТ

© Авторы, 2026
SPIN: 7984-8836

БУЛГАКОВ Алексей Григорьевич
доктор технических наук, профессор
НИИСФ РААСН
(Россия, Москва, e-mail: agi.bulgakov@mail.ru)

SPIN: 7624-5322

СЕРГЕЕВА Ирина Владимировна
кандидат технических наук, доцент
МГСУ
(Россия, Москва)

АСЕЕВ Вячеслав Юрьевич
аспирант
Юго-Западный государственный университет
(Россия, Курск)

SPIN: 5201-3550

ШУБИН Игорь Любимович
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор,
Заслуженный строитель РФ, директор
НИИСФ РААСН
(Россия, Москва)

ХОЛЬШЕМАХЕР Клаус
доктор технических наук, профессор
Высшая школа техники, экономики и культуры
(Германия, Лейпциг)

SPIN: 1041-9513

АНПИЛОВ Сергей Михайлович
Заслуженный изобретатель РФ, д.т.н., Почетный профессор НГАСУ (СИБСТРИН),
ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных конструкций
кафедры ЖБК
НГАСУ (СИБСТРИН)
(Россия, Новосибирск)

SPIN: 5316-5749

ТАРАКАНОВ Олег Вячеславович
доктор технических наук, профессор
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(Россия, Пенза)

Аннотация. В статье рассмотрен подход к выбору оптимального варианта реконструкции строительных сооружений с использованием бетонных плит, армированных базальтовым волокном. Сформирована система критериев оценки альтернативных решений и предложена процедура многокритериального выбора, включающая определение весовых коэффициентов, нормализацию показателей и расчёт интегральной оценки вариантов. В качестве информационной базы использованы результаты экспериментальных исследований, а также расчётные и сравнительные данные. Практическая апробация выполнена на условном примере выбора варианта реконструкции плитного элемента. Показано, что многокритериальная оценка позволяет сопоставлять альтернативы по совокупности показателей и выбирать предпочтительное решение.



Ключевые слова: реконструкция зданий и сооружений; бетонные плиты; армирование базальтовым волокном; алгоритм интеллектуального принятия решений

Благодарности: работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003; Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, проект РААСН № 124042400059-1.

Для цитирования: Выбор оптимального варианта реконструкции строительных сооружений с применением армированных базальтовым волокном бетонных плит / А.Г. Булгаков, И.В. Сергеева, И.В. Сергеева, И.Л. Шубин, К. Хольшемахер, С.М. Анпилов, О.В. Тараканов // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 69-80. doi:10.51608/26867818_2026_2_69.

Original article

CHOOSING THE OPTIMAL OPTION FOR RECONSTRUCTING BUILDINGS USING BASALT FIBER-REINFORCED CONCRETE SLABS

©The Author(s) 2026

BULGAKOV Alexey Grigorievich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
Research Institute of building physics (NIISF)
(Russia, Moscow)

SERGEEVA Irina Vladimirovna

Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor
National Research Moscow State University of Civil Engineering
(Russia, Moscow)

ASEEV Vyacheslav Yurievich

PhD Candidate
Ufa State Petroleum Technological University
(Russia, Ufa)

SHUBIN Igor Lyubimovich

Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof., director
Research Institute of building physics (NIISF)
(Russia, Moscow)

HOLSCHEMACHER Klaus

Doctor of Sciences (Technical), Professor
Leipzig University of Applied Sciences (HTWK)
(Germany, Leipzig)

ANPILOV Sergey Mikhailovich

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Honorary Professor
of SIBSTRIN, Leading Researcher at the Testing Center for Building Structures at the
Department of Concrete Structures
Novosibirsk State Architectural and Construction University
(Russia, Novosibirsk)

TARAKANOV Oleg Vyacheslavovich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
Penza State University of Architecture and Construction
(Russia, Penza)

Abstract. This article examines an approach to selecting the optimal option for reconstructing building structures using basalt fiber-reinforced concrete slabs. A system of criteria for evaluating alternative solutions is developed, and a multi-criteria selection procedure is proposed, including determining weighting factors, normalizing indicators, and calculating an integrated as-



essment of the options. The results of experimental studies, as well as calculated and comparative data, are used as the information base. A practical test was conducted using a hypothetical example of choosing an option for reconstructing a slab element. It is demonstrated that multi-criteria evaluation allows for comparing alternatives based on a set of indicators and selecting the preferred solution.

Keywords: building and structure reconstruction; concrete slabs; basalt fiber reinforcement; intelligent decision-making algorithm

Acknowledgments: The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FSWG-2026-0003; the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, project RAASN no. 124042400059-1.

For citation: Choosing the optimal option for reconstructing buildings using basalt fiber-reinforced concrete slabs / A.G. Bulgakov, I.V. Sergeeva, V.Yu. Aseev, I.L. Shubin, K. Holschemacher, S.M. Anpilov, O.V. Tarakanov // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 69-80. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_69.

Введение. Реконструкция существующего фонда зданий и сооружений приобретает всё большее значение, поскольку значительная часть строительных объектов продолжает эксплуатироваться при возрастающих нагрузках и воздействии неблагоприятных химико-биологических и климатических факторов [1-2]. Физический и моральный износ несущих конструкций приводит к снижению их надёжности и необходимости принятия решений по восстановлению или повышению несущей способности [3-4].

Значительная часть зданий и сооружений эксплуатируется в течение длительного периода, что сопровождается физическим износом несущих конструкций и снижением их надёжности. Повышенные нагрузки, изменение функционального назначения объектов, воздействие агрессивной среды, перепады температуры и влажности, естественное старение материалов приводят к тому, что традиционные конструктивные решения не всегда обеспечивают требуемый уровень прочности, жёсткости и долговечности.

Плитные железобетонные элементы широко применяются в фасадах и перекрытиях промышленных и гражданских сооружений. Они воспринимают эксплуатационные нагрузки и обеспечивают пространственную жёсткость здания. Вопросы оценки их технического состояния, выбора рациональных способов усиления и замены имеют важное практическое значение.

Традиционно выбор варианта реконструкции осуществляется на основе отдельных показателей: стоимости работ, прочности, технологичности или долговечности. Однако сравниваемые решения обладают разнонаправленными преимуществами и ограничениями. Один вариант может обеспечивать более высокую несущую способность, другой – меньшую стоимость, третий – большую долговечность. Выбор по одному критерию не позволяет получить объективный результат.

В последние годы внимательно рассматриваются использование композитных материалов, в том

числе базальтовое армирование, в качестве перспективного направления совершенствования конструктивных решений [5-8]. Базальтовая арматура обладает коррозионной стойкостью, малой плотностью, устойчивостью к агрессивным средам и потенциальной возможностью повышения долговечности строительных элементов [9-11].

Применение новых материалов требует не только экспериментального подтверждения их работоспособности, но и разработки методов корректного сопоставления с традиционными вариантами. Необходимо формирование системы критериев оценки, отражающей технические, экономические и эксплуатационные характеристики сравниваемых альтернатив, а также разработку метода выбора на основе многокритериального анализа.

Современное состояние вопроса реконструкции железобетонных плитных конструкций и применения базальтового армирования. Благодаря конструктивной универсальности, технологичности и способности воспринимать распределённые нагрузки плитные железобетонные конструкции широко применяются в междуэтажных перекрытиях, покрытиях, дорожных и промышленных плитах, специальных инженерных сооружениях [12].

Плиты покрытия и перекрытия воспринимают эксплуатационные нагрузки и определяют общую надёжность сооружения.

Классические подходы ориентированы на замену повреждённого элемента или усиление с использованием традиционных материалов и технологий. Однако всё большее внимание уделяется применению композитных материалов, в том числе базальтового армирования. Задача обоснованного выбора варианта реконструкции приобретает особую значимость, требуя учёта не только прочностных показателей, но и стоимости, долговечности, ремонтно-пригодности, технологичности, эксплуатационных затрат на протяжении жизненного цикла.

В процессе длительной эксплуатации плитные элементы подвергаются многократным переменным нагрузкам, температурно-влажностным воздей-



ствиям, образованию и раскрытию трещин, карбонизации бетона, коррозии арматуры, локальным повреждениям. При возникновении дефектов, повреждений, трещинообразования, коррозии арматуры или необходимости увеличения расчётной несущей способности возникает задача выбора рационального варианта реконструкции. Совокупное действие этих факторов приводит к снижению несущей способности, увеличению прогибов и ухудшению технического состояния [13-14].

Реконструкция плитных элементов осложняется необходимостью учитывать одновременно конструктивные, технологические и экономические ограничения. Усиление не должно существенно увеличивать собственный вес, затруднять монтажные работы или вызывать значительное удорожание. В условиях реконструкции требуется минимизация сроков работ и снижение вмешательства в эксплуатацию объекта. Особенно важен поиск решений, обеспечивающих достаточный прирост технических характеристик при приемлемом уровне затрат.

Базальтовое армирование относится к современным композитным решениям, применяемым для повышения стойкости конструкций к коррозионным и агрессивным воздействиям. В отличие от стальной арматуры, базальтовая характеризуется высокой коррозионной стойкостью, малой плотностью и устойчивостью к воздействию химически агрессивных сред.

Применение базальтового армирования в бетонных плитах представляет интерес с точки зрения повышения долговечности и потенциального снижения эксплуатационных расходов. За счёт меньшей подверженности коррозии такие решения могут быть особенно эффективны в условиях повышенной влажности, действия солей, циклического замораживания и оттаивания, эксплуатации в неблагоприятной среде [15]. Использование базальтовой арматуры требует тщательной оценки её работы в составе бетонного элемента. Важно учитывать не только преимущества, но и особенности деформативности, сцепления с бетоном, характера разрушения и поведения конструкции под нагрузкой [16]. Вопрос применения базальтового армирования должен решаться на основе экспериментального и расчётного обоснования [17].

Экспериментальные данные формируют доказательную базу для выбора критериев оценки. На их основании могут быть обоснованы такие параметры, как несущая способность, деформативность, характер трещинообразования и особенности предельного состояния конструкций.

Критерии выбора оптимального варианта реконструкции. Выбор оптимального варианта реконструкции должен осуществляться на основе совокупной оценки ряда взаимосвязанных показателей, отражающих техническую, экономическую, эксплуата-

ционную и экологическую эффективность решения [18-19].

Выбор целесообразно выполнять в рамках многокритериального подхода [20], при котором каждая альтернатива оценивается по системе заранее сформулированных критериев. Такая постановка позволяет учитывать не только конструктивную пригодность варианта, но и его эффективность в реализации, эксплуатационные свойства и долгосрочную целесообразность.

Представленная система критериев носит расширенный характер и предназначена для описания общего пространства выбора. В рамках практической апробации используется сокращённый набор критериев, для которых в рассматриваемом примере имеются наиболее определённые исходные данные.

Система критериев включает четыре основные группы: технические, экономические, эксплуатационные и экологические. Сводная система критериев приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Система критериев выбора оптимального варианта реконструкции

Группа критериев	Критерий	Ед. изм.	Направление оптимизации	Способ оценки
Технические	Несущая способность при изгибе	кН	Максимум	Испытания, расчёт
	Деформативность (прогиб)	мм	Минимум	Испытания, расчёт
	Долговечность	годы / балл	Максимум	Прогнозная и экспертная оценка
Экономические	Стоимость материалов	руб.	Минимум	Сметный расчёт
	Стоимость работ	руб.	Минимум	Сметный расчёт
	Совокупные затраты жизненного цикла	руб.	Минимум	Интегральный расчёт
Эксплуатационные	Ремонтопригодность	балл	Максимум	Экспертная оценка

Система критериев, представленная в таблице 1, является содержательной основой для разработки метода многокритериального выбора.

Метод интеллектуального принятия решений.

Выбор оптимального варианта реконструкции строительных сооружений с применением бетонных плит, армированных базальтовым волокном, относится к классу многокритериальных задач принятия решений, в которых требуется одновременно учитывать технические, экономические, эксплуатационные и экологические критерии, сформированные и представленные в таблице 1. В таких условиях применение однокритериального подхода не позволяет получить объективно обоснованное решение, по-



сколькx улучшение одного показателя может сопровождаться ухудшением других.

В настоящей работе предлагается метод интеллектуального принятия решений, основанный на сочетании экспертного определения значимости критериев и последующей количественной интегральной оценки альтернатив [21]. Общая структура предлагаемого метода представлена на рис. 1. Она включает формирование системы критериев, определение их весовых коэффициентов, нормализацию исходных показателей и вычисление интегральной оценки каждого варианта.

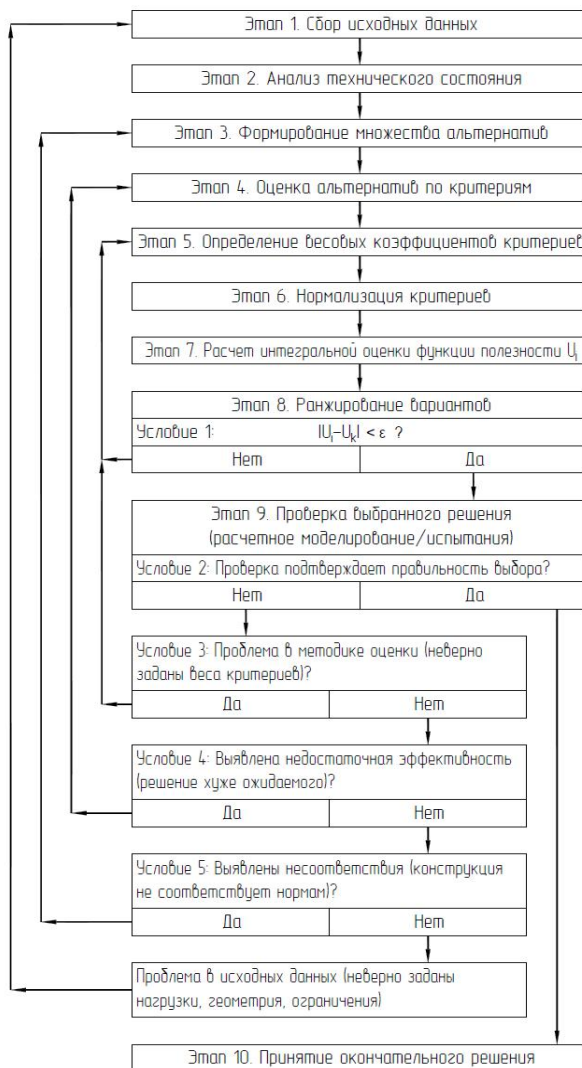


Рис. 1. Структурная схема метода интеллектуального принятия решений при выборе оптимального варианта реконструкции

В качестве математической основы используется аддитивная многокритериальная модель, в которой итоговая оценка варианта определяется как взвешенная сумма нормализованных критериев [22]. Для определения весовых коэффициентов применяется экспертное попарное сравнение по методу анализа иерархий Т. Саати, позволяющее формализовать относительную важность показателей и проверить согласованность экспертных суждений [23].

Процедура попарного сравнения используется как способ экспертного задания относительной значимости критериев. Полученные оценки приводятся к нормированному виду и используются для расчёта весовых коэффициентов, применяемых в интегральной модели выбора. После формирования системы критериев осуществляется определение их относительной значимости. С этой целью строится матрица попарных сравнений:

$$A = (a_{ij}), \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

где a_{ij} – оценка относительной важности критерия i по сравнению с критерием j , а n – число рассматриваемых критериев.

Для упорядочения относительной значимости критериев используется процедура экспертного попарного сравнения, основанная на фундаментальной шкале Саати, приведённой в таблице 2.

Таблица 2 – Фундаментальная шкала относительной важности Саати

Числовое значение	Интерпретация
1	Равная важность сравниваемых критериев
2	Промежуточное значение между соседними суждениями
3	Умеренное превосходство одного критерия над другим
4	Промежуточное значение между соседними суждениями
5	Существенное превосходство одного критерия над другим
6	Промежуточное значение между соседними суждениями
7	Значительное превосходство одного критерия над другим
8	Промежуточное значение между соседними суждениями
9	Очень сильное превосходство одного критерия над другим
Обратные значения 1/2, 1/3, ..., 1/9	Используются при обратном сравнении критериев

По данной шкале значения 1, 3, 5, 7 и 9 соответствуют равной, умеренной, существенной, сильной и абсолютной степени предпочтения одного критерия над другим, а промежуточные чётные значения применяются для более точного отражения экспертного мнения. Для матрицы попарных сравнений выполняется условие обратной симметрии:

$$a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, \quad a_{ii} = 1, \quad (2)$$

что обеспечивает внутреннюю логическую согласованность процедуры сравнения.

Для практического определения значений весов используется прикладная вычислительная схема, основанная на нормализации матрицы по столбцам



и последующем усреднении элементов строк. Нормализованные элементы матрицы определяются по выражению:

$$\widetilde{a}_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{i=1}^n a_{ij}}, \quad (3)$$

после чего весовой коэффициент w_i вычисляется как среднее значение элементов i -й строки нормализованной матрицы:

$$w_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \widetilde{a}_{ij}, \quad (4)$$

при этом выполняется условие нормировки весов:

$$\sum_{i=1}^n w_i = 1, \quad (5)$$

что делает возможным их дальнейшее использование в интегральной функции полезности.

Для метода попарных сравнений в общем случае может использоваться проверка согласованности экспертных оценок. С этой целью определяется максимальное собственное значение матрицы λ_{max} , после чего рассчитывается индекс согласованности:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1}, \quad (6)$$

и отношение согласованности:

$$CR = \frac{CI}{RI}, \quad (7)$$

где RI – случайный индекс, зависящий от порядка матрицы.

В соответствии с принятым подходом значения $CR < 0,1$ свидетельствуют о приемлемой согласованности экспертных оценок, тогда как превышение данного порога указывает на необходимость корректировки матрицы попарных сравнений.

Для практической апробации используются нормированные весовые коэффициенты критериев, принятые на основе экспертного попарного сравнения и отражающие относительную значимость выбранных показателей в рамках данного примера.

Поскольку критерии, включённые в таблицу 1, имеют различную физическую природу, различаются по размерности и направлению предпочтительности, их непосредственное суммирование невозможно. После определения весовых коэффициентов выполняется нормализация исходных показателей, позволяющая привести все критерии к единой безразмерной шкале от 0 до 1.

Для критериев, подлежащих максимизации, нормализованное значение определяется по выражению:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{min}}{x_j^{max} - x_j^{min}}, \quad (8)$$

где x_{ij} – значение j -го критерия для i -го варианта реконструкции, x_j^{min} и x_j^{max} – соответственно минимальное и максимальное значения данного критерия среди всех рассматриваемых альтернатив.

Для критериев, подлежащих минимизации, используется выражение:

$$r_{ij} = \frac{x_j^{max} - x_{ij}}{x_j^{max} - x_j^{min}}. \quad (9)$$

При таком способе нормализации наилучшее значение любого критерия стремится к 1, а наименее предпочтительное – к 0. Это обеспечивает сопоставимость показателей различной природы и создаёт основу для их дальнейшего включения в единую интегральную модель.

Для критериев, имеющих качественный или экспертно оцениваемый характер, исходные значения могут задаваться в балльной форме [24]. После этого такие показатели нормализуются по тем же правилам, что и количественные критерии, что позволяет учитывать их в общей процедуре оценки альтернатив.

После определения весов критериев и нормализации исходных показателей для каждого варианта рассчитывается интегральная функция полезности. Используется аддитивная форма интегральной оценки:

$$U_i = \sum_{j=1}^m w_j r_{ij}, \quad (10)$$

где U_i – интегральная оценка i -го варианта реконструкции, w_j – вес j -го критерия, r_{ij} – нормализованное значение j -го критерия для i -й альтернативы, m – число критериев.

Чем больше значение U_i , тем более предпочтительным считается соответствующий вариант реконструкции, поскольку в интегральной форме учитывается вклад всех групп критериев [25].

Преимуществом такого подхода является его прозрачность и удобство инженерной интерпретации. Каждый критерий сохраняет самостоятельное содержательное значение, а его вклад в итоговую оценку определяется как нормализованным уровнем показателя, так и относительной значимостью в общей системе критериев.

Использование интегральной функции полезности позволяет сопоставлять между собой альтернативы, различающиеся одновременно по нескольким показателям.

При выборе варианта реконструкции часть исходной информации может носить неопределённый, неполный или экспертный характер. Это особенно относится к оценке долговечности, экологической эффективности материала, ремонтпригодности, а также к прогнозным параметрам поведения конструкции в длительной эксплуатации.

В качестве возможного расширения разработанного метода могут использоваться инструменты нечёткой логики и вероятностные модели. Их применение позволяет учитывать расплывчатость экспертных суждений, интервальный характер некоторых параметров и случайную изменчивость внешних воздействий [26].

Дополнительную роль в интеллектуальном принятии решений играет база знаний, в которой могут аккумулироваться результаты обследований, сведения о свойствах материалов, данные лабора-



торных испытаний, характеристики ранее реализованных вариантов реконструкции и информация об их эксплуатационной эффективности. Использование такой базы позволяет повысить обоснованность экспертных оценок, обеспечить преемственность инженерного опыта и снизить степень субъективности при принятии решения.

Результатом применения предложенной схемы оценки является получение для каждого варианта интегральной оценки U_i , отражающей его общую предпочтительность по принятой совокупности критериев. На основе рассчитанных значений выполняется сопоставление альтернатив и определяется наиболее предпочтительный вариант в рамках рассматриваемой задачи сравнения.

Предложенный подход задаёт формализованную процедуру оценки вариантов реконструкции, основанную на системе критериев таблицы 1, экспертном задании их относительной значимости, нормализации показателей и расчёте интегральной функции полезности. Представленная схема используется как основа для последующей разработки алгоритма выбора и его практической апробации.

Алгоритм выбора оптимального варианта. Разработанный алгоритм выбора оптимального варианта реконструкции представляет собой прикладную реализацию метода интеллектуального принятия решений. Если в предыдущем разделе была сформирована математическая модель многокритериальной оценки, то сейчас рассматривается последовательность практических действий, обеспечивающих переход от исходных данных по объекту реконструкции к обоснованному выбору наиболее предпочтительного проектного решения.

Алгоритм ориентирован на применение в задачах реконструкции строительных сооружений, в которых требуется сопоставление традиционных железобетонных решений и вариантов с использованием бетонных плит, армированных базальтовым волокном. Его применение основано на системе критериев, представленной в таблице 1, на процедуре определения весов критериев по методу Саати, а также на дальнейшей интегральной оценке альтернатив. Общая схема реализации алгоритма представлена на рис. 1, а содержание отдельных этапов, их входные и выходные данные – в таблице 3.

Первым этапом алгоритма является сбор исходной информации по реконструируемому сооружению (таблица 3). На данной стадии учитываются результаты технического обследования объекта, фактическое состояние несущих элементов, геометрические параметры плит, уровень эксплуатационных нагрузок, требования по надёжности, ограничения по стоимости, а также условия дальнейшей эксплуатации.

Формируется система исходных ограничений, в рамках которых должен осуществляться выбор проектного решения. К числу таких ограничений относятся допустимые габариты усиливающих элементов, предельные деформации, требования к массе конструкции, технологические возможности монтажа, допустимая продолжительность реконструкции и условия долговременной эксплуатации.

Подготовка исходных данных должна обеспечивать возможность последующей оценки альтернатив по критериям таблицы 1. Тем самым уже на начальном этапе создаётся информационная база, необходимая для формирования вариантов реконструкции, расчёта показателей и их дальнейшего сопоставления.

Таблица 3 – Этапы алгоритма выбора оптимального варианта реконструкции, входные и выходные данные

Этап	Содержание этапа	Входные данные	Выходные данные
1	Сбор исходных данных по объекту	Результаты обследования, геометрия, нагрузки, эксплуатационные требования	Исходная информационная база по объекту
2	Анализ технического состояния сооружения	Данные обследования, сведения о дефектах и повреждениях	Оценка состояния конструкций, перечень ограничений
3	Формирование множества альтернатив	Исходные данные, проектные ограничения, возможные конструктивные решения	Набор допустимых вариантов реконструкции
4	Оценка альтернатив по критериям	Расчётные и экспериментальные данные, нормативные требования	Значения критериев по каждому варианту
5	Определение весов критериев	Система критериев, экспертные оценки, шкала Саати	Весовые коэффициенты критериев
6	Нормализация критериев	Исходные значения критериев, направления оптимизации	Нормализованные значения критериев
7	Расчёт интегральной функции полезности	Весовые коэффициенты, нормализованные критерии	Значения U_i для всех альтернатив
8	Ранжирование вариантов	Интегральные оценки U_i	Упорядоченный список альтернатив
9	Проверка выбранного решения	Лучший вариант, расчётные модели, результаты испытаний	Подтверждение или уточнение выбора
10	Принятие окончательного решения	Результаты ранжирования и проверки	Оптимальный вариант реконструкции

После сбора исходных данных осуществляется формирование множества допустимых альтернатив реконструкции. В рамках рассматриваемой задачи в состав альтернатив целесообразно включать традиционную железобетонную плиту, плиту с ба-



зальтовым армированием, а также вариант с изменённой конфигурацией или параметрами базальтового армирования.

Формирование альтернатив должно производиться с учётом технической реализуемости каждого решения и ограничений, установленных на предыдущем этапе. На данной стадии исключаются варианты, не удовлетворяющие базовым нормативным требованиям по прочности, деформативности, геометрическим параметрам, условиям монтажа или экономической целесообразности.

В результате для дальнейшего анализа сохраняются только те альтернативы, которые могут быть практически реализованы в условиях конкретного объекта реконструкции. Такой подход обеспечивает содержательную корректность последующего сравнения.

Следующий этап алгоритма связан с оценкой каждой альтернативы по системе критериев, представленной в таблице 1. Для каждого варианта определяются значения технических, экономических, эксплуатационных и экологических показателей.

К техническим показателям относятся несущая способность при изгибе, деформативность, трещиностойкость, прочность на сжатие бетона, прочность на растяжение при изгибе, долговечность, стойкость к агрессивным средам и термостойкость. Экономическая группа включает стоимость материалов, стоимость работ, экономию арматуры и совокупные затраты жизненного цикла. К эксплуатационным критериям относятся жёсткость, предсказуемость деформирования, сохранение работоспособности после трещинообразования, стойкость к истиранию и ударным воздействиям, а также ремонтпригодность. Экологические критерии охватывают материалоемкость, снижение объёма ремонтных вмешательств, продление срока службы конструкции и экологическую эффективность материала.

Источником данных для оценки служат результаты обследования, расчётные зависимости, нормативно-техническая документация, литературные сведения и результаты лабораторных испытаний. Экспериментальные данные позволяют уточнить показатели несущей способности, деформативности, трещиностойкости и характера разрушения, тогда как экономические, экологические и долговечностные параметры в значительной мере определяются расчётным, сравнительным или прогнозным способом.

После определения исходных значений критериев выполняется их подготовка к последующей нормализации в соответствии с ранее изложенной математической моделью. Тем самым обеспечивается переход от набора разноразмерных показателей к сопоставимой системе параметров.

После расчёта исходных показателей определяется относительная значимость критериев. В соответствии с методом интеллектуального принятия решений, весовые коэффициенты рассчитываются на основе экспертного попарного сравнения критериев по методу анализа иерархий Саати. При выполнении попарных сравнений используется шкала относительной важности критериев, приведённая в таблице 2.

На основе экспертных оценок формируется матрица попарных сравнений, которая затем нормализуется и используется для вычисления весовых коэффициентов критериев. Полученные веса подлежат обязательной проверке на согласованность с использованием индекса согласованности CI и отношения согласованности CR , что позволяет исключить внутренне противоречивые экспертные суждения.

После определения весов производится нормализация критериев по формулам 1-10. Для критериев, подлежащих максимизации, нормализованное значение возрастает при улучшении показателя, тогда как для критериев, подлежащих минимизации, используется обратная зависимость. В результате все показатели переводятся в единую безразмерную шкалу, что делает возможным их последующее агрегирование в интегральную оценку.

После определения весовых коэффициентов и нормализации показателей для каждого варианта рассчитывается интегральная функция полезности U_i в соответствии с представленной ранее моделью. Данный показатель отражает общую предпочтительность альтернативы с учётом всей совокупности критериев таблицы 1.

По рассчитанным значениям U_i выполняется ранжирование альтернатив по убыванию интегральной оценки. Наиболее предпочтительным считается вариант, для которого значение функции полезности является максимальным, поскольку именно он обеспечивает наилучшее сочетание технической эффективности, эксплуатационной надёжности, экономической целесообразности и долговечности.

Ранжирование альтернатив не исключает дополнительного инженерного анализа результатов. Если два варианта имеют близкие значения интегральной оценки, может потребоваться уточнение отдельных критериев, корректировка экспертных весов либо дополнительный анализ чувствительности модели к изменению исходных параметров. Такой подход повышает надёжность окончательного выбора и снижает риск принятия формального решения при несущественной разнице итоговых оценок.

Например, один вариант может превосходить другой по несущей способности при изгибе и трещиностойкости, но уступать ему по стоимости работ и совокупным затратам жизненного цикла. В этом случае окончательный выбор определяется не отдель-



ным критерием, а интегральным результатом многокритериальной оценки.

После предварительного выбора оптимального варианта алгоритм предусматривает этап проверки полученного решения. Такая проверка необходима для подтверждения того, что выбранная альтернатива действительно обеспечивает требуемый уровень надёжности, соответствует условиям эксплуатации и может быть реализована в реальных условиях реконструкции.

Проверка решения может выполняться двумя основными способами. Во-первых, используется расчётное моделирование нагрузок и анализ напряжённо-деформированного состояния конструкции. Во-вторых, при наличии соответствующих данных проводится лабораторная проверка либо сопоставление с результатами ранее выполненных испытаний образцов.

Если результаты проверки подтверждают правильность выбора, решение принимается к дальнейшей проектной проработке. В случае выявления несоответствий или недостаточной эффективности алгоритм допускает возврат к предыдущим этапам: уточнение исходных данных, корректировку множества альтернатив, изменение состава критериев либо пересмотр весовых коэффициентов. Тем самым обеспечивается адаптивный характер алгоритма и возможность его применения в условиях неполной или уточняемой информации.

Разработанный алгоритм обеспечивает последовательную реализацию метода интеллектуального принятия решений и позволяет перейти от исходных данных обследования объекта к обоснованному выбору оптимального варианта реконструкции. Его отличительной особенностью является объединение инженерного расчёта, экспертной оценки, многокритериального анализа и процедуры проверки результатов в единую логически связанную схему, представленную на рис. 1 и конкретизированную в таблице 3.

Практическая применимость предложенного алгоритма проявляется в возможности его использования для сопоставления традиционных железобетонных и базальтоармированных плитных решений в условиях реконструкции строительных сооружений. Дальнейшая апробация алгоритма и оценка его работоспособности рассматриваются на примере экспериментальных и расчётных данных.

Практическая апробация метода и алгоритма выбора оптимального варианта реконструкции. Практическая апробация метода выполнена на условном примере сравнения трёх вариантов реконструкции плитного элемента. Используемые исходные данные имеют смешанный характер и включают экспериментальные результаты, расчётные показатели, а также сравнительные и экспертно принятые оценки,

необходимые для сопоставления альтернатив по единой системе критериев. Приведённый пример следует рассматривать как иллюстрацию применения предложенного подхода, а не как универсальный нормативный шаблон выбора для всех объектов реконструкции.

В качестве исходных данных для апробации использовались расчётные параметры, сведения о конструктивных характеристиках рассматриваемых плитных решений, а также результаты экспериментальных исследований плит с базальтовым армированием. Для традиционного железобетонного варианта применялись расчётные и теоретические данные, использованные в качестве базы для сравнительной оценки.

Практическая апробация основывалась на комбинированной информационной базе, включающей экспериментальные результаты, расчётные оценки и теоретические данные сравнения. Это позволило корректно сопоставить традиционное решение с вариантами реконструкции, предусматривающими применение базальтового армирования, и продемонстрировать практическое применение разработанного метода в условиях типовой задачи выбора.

Для практической апробации были сформированы три варианта реконструкции, сопоставимые по условиям применения и отличающиеся конструктивным исполнением плитного элемента.

Вариант 1 предусматривал использование традиционной железобетонной плиты и рассматривался как базовое решение для сравнения. Вариант 2 основывался на применении плиты с базальтовым армированием, для которой использовались результаты экспериментальных исследований и расчётной оценки. Вариант 3 представлял собой плиту с изменённой конфигурацией или повышенными параметрами базальтового армирования, ориентированную на достижение более высоких технических характеристик.

Такое построение множества альтернатив соответствует алгоритму, описанному алгоритму, и позволяет сопоставить как традиционное конструктивное решение, так и более современные варианты реконструкции с применением базальтового армирования. Все три варианта удовлетворяли базовым требованиям технической реализуемости и были приняты к дальнейшей многокритериальной оценке.

Для удобства последующей оценки варианты были обозначены следующим образом: вариант 1 – традиционная железобетонная плита; вариант 2 – плита с базальтовым армированием; вариант 3 – плита с повышенными параметрами базальтового армирования.

Сравнение вариантов выполнялось на основе системы критериев, сформированной ранее и пред-



ставленной в таблице 1. В рамках практической апробации основное внимание было сосредоточено на показателях, наиболее значимых для плитных конструкций: несущей способности при изгибе, деформативности, долговечности, стоимости реализации, совокупных затратах жизненного цикла и ремонтнопригодности.

Исходные значения выбранных критериев для трёх рассматриваемых вариантов представлены в таблице 4. Для вариантов с базальтовым армированием исходные значения формировались с использованием результатов экспериментальных исследований и расчётных оценок, тогда как для традиционной железобетонной плиты применялись расчётные и теоретические данные сравнительного характера.

Таблица 4 – Исходные значения критериев для сравниваемых вариантов реконструкции

Критерий	Обозначение	Направление оптимизации	Варианты		
			Вариант 1. – традиционная железобетонная плита	Вариант 2 – плита с базальтовым армированием	Вариант 3 – плита с базальтовым армированием (усиленное)
Несущая способность при изгибе, кН	R_b	max	100	110	118
Деформативность (прогиб), мм	F	min	12.0	10.5	9.8
Долговечность, годы	D	max	40	46	50
Стоимость реализации, усл.ед.	C	min	100	88	108
Совокупные затраты жизненного цикла, усл.ед.	LCC	min	100	84	90
Ремонтнопригодность, балл	Mr	max	0.60	0.80	0.75

Представленные в таблице 4 значения различаются по способу получения. Показатели несущей способности и деформативности в большей степени связаны с экспериментально-расчётной основой исследования, тогда как долговечность, совокупные затраты жизненного цикла и ремонтнопригодность носят оценочный и сравнительный характер в рамках рассматриваемого примера.

Предварительный анализ данных таблицы 4 показывает, что вариант 3 обладает более высокими техническими показателями по сравнению с традиционным решением. Его несущая способность при изгибе превышает показатель варианта 1 примерно на 18%, а прогнозируемая долговечность – на 25%. Вместе с тем вариант 2 характеризуется более благоприятными экономическими показателями и оказы-

вается примерно на 12% дешевле варианта 1 по стоимости реализации.

Следовательно, уже на стадии сопоставления исходных данных становится очевидно, что ни один из вариантов не имеет абсолютного преимущества по всем критериям одновременно. Вариант 3 демонстрирует лучшие технические характеристики, вариант 2 отличается более выгодными экономическими параметрами, а вариант 1 выступает в качестве базовой альтернативы. Это подтверждает необходимость использования многокритериального подхода к выбору оптимального варианта реконструкции.

После определения исходных значений критериев была выполнена их нормализация в соответствии с зависимостями, приведёнными ранее. Для критериев, подлежащих максимизации, использовалась схема нормализации с ростом значения при улучшении показателя, а для критериев, подлежащих минимизации, – обратная схема приведения к безразмерной шкале от 0 до 1.

Далее были использованы весовые коэффициенты критериев, полученные на основе экспертного попарного сравнения по методу Саати. С учётом нормализованных значений и весов для каждого варианта была рассчитана интегральная функция полезности U_i , отражающая общую предпочтительность соответствующей альтернативы.

Результаты нормализации критериев, принятые весовые коэффициенты, интегральные оценки вариантов реконструкции и их ранги представлены в таблице 5. Для наглядного сопоставления итоговых интегральных оценок результаты ранжирования дополнительно представлены на рис. 2.

Таблица 5 – Нормализованные значения критериев, весовые коэффициенты и интегральные оценки вариантов реконструкции

Критерий	Вес w_j	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
Несущая способность при изгибе	0.20	0.000	0.556	1.000
Деформативность (прогиб)	0.10	0.000	0.682	1.000
Долговечность	0.15	0.000	0.600	1.000
Стоимость реализации	0.25	0.250	1.000	0.000
Совокупные затраты жизненного цикла	0.20	0.000	1.000	0.625
Ремонтнопригодность	0.10	0.000	1.000	0.750
ИТОГОВАЯ ТАБЛИЦА				
Вариант	Интегральная оценка U_i	Ранг		
Вариант 1	0,063	3		
Вариант 2	0,819	1		
Вариант 3	0,65	2		

Анализ результатов таблицы 5 и рис. 2 показывает, что наиболее предпочтительным по совокупности критериев является вариант 2 (плита с базальтовым армированием) с интегральной оценкой 0,819.



Вариант 3 (плита с повышенными параметрами базальтового армирования) занимает второе место с интегральной оценкой 0,650, а традиционное железобетонное решение (вариант 1) демонстрирует наименьшую общую эффективность с интегральной оценкой 0,063.

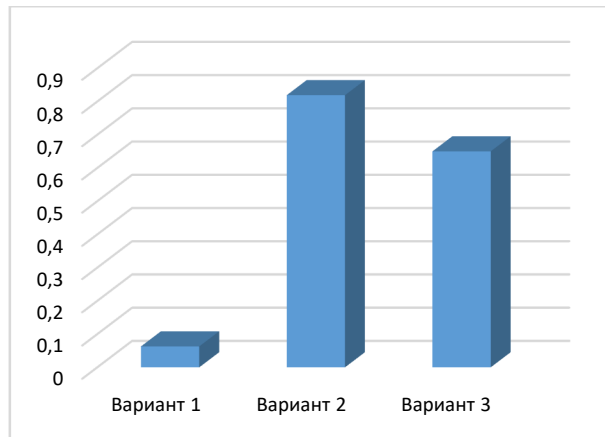


Рис. 2. Сравнение интегральных оценок вариантов реконструкции

Полученные результаты подтверждают, что применение базальтового армирования при реконструкции плитных конструкций в рамках рассматриваемого примера является целесообразным и позволяет добиться более высокой комплексной эффективности по сравнению с традиционным железобетонным решением. Вариант 2 оказался наиболее сбалансированным по совокупности технических, экономических и эксплуатационных характеристик.

Заключение

1. Предложенный метод интеллектуального принятия решений при выборе оптимального варианта реконструкции строительных сооружений с применением бетонных плит, армированных базальтовым волокном, основан на многокритериальной оценке альтернатив. В отличие от однокритериальных подходов он позволяет учитывать совокупное влияние технических, экономических, эксплуатационных и экологических факторов, что обеспечивает более обоснованный выбор проектного решения.

2. Сформированная и систематизированная система критериев выбора варианта реконструкции бетонных сооружений включает показатели несущей способности, деформативности, долговечности, стоимости реализации, совокупных затрат жизненного цикла, ремонтпригодности и других значимых характеристик. Критерии объединены в единую формализованную структуру, пригодную для последующего количественного сравнения альтернатив.

3. Процедура определения весовой значимости критериев на основе метода анализа иерархий Саати с последующей нормализацией исходных показателей и расчётом интегральной функции полезности позволяет перейти от набора разнонаправленных

и разнонаправленных характеристик к единой безразмерной оценке, обеспечивающей сопоставимость рассматриваемых вариантов реконструкции.

4. Разработанный алгоритм выбора оптимального варианта реконструкции обеспечивает последовательный переход от исходных данных обследования объекта и набора допустимых альтернатив к их ранжированию, проверке и принятию окончательного решения. Отличительной особенностью алгоритма является объединение инженерных расчётов, экспериментальных данных и экспертной оценки в единую логически связанную процедуру.

5. Выполнена практическая апробация разработанного метода и алгоритма на условном примере выбора из трёх вариантов реконструкции плитного элемента. По результатам многокритериальной оценки установлено, что наилучшей интегральной характеристикой обладает вариант с базальтовым армированием, получивший итоговую оценку 0,819, тогда как вариант с усиленным базальтовым армированием занял второе место, а традиционная железобетонная плита - третье.

Обоснована целесообразность применения базальтового армирования при реконструкции плитных конструкций в рамках рассмотренной постановки задачи. Установлено, что наиболее предпочтительный вариант с базальтовым армированием обеспечивает более сбалансированное сочетание технической эффективности, экономической приемлемости и эксплуатационной надёжности по сравнению с традиционным железобетонным решением.

Библиографический список

1. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Казначеев С.В., Смирнов В.Ф. Влияние эксплуатационной среды на биостойкость строительных композитов // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – № 7 (33). – С. 23–31.
2. Ерофеев В.Т., Богатов А.Д., Богатова С.Н., Смирнов В.Ф., Захарова Е.А. Исследование биостойкости строительных материалов с учетом их старения // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2011. – № 22 (41). – С. 73–78.
3. Римшин В.И., Шубин И.Л., Ерофеев В.Т., Аветисян А.А. Автоматизация жизненного цикла зданий при реконструкции и капитальном ремонте // Жилищное строительство. – 2022. – № 7. – С. 6–12.
4. Ерофеев В.Т., Светлов Д.А., Казначеев С.В. Противодействие биоповреждениям на этапах строительства, эксплуатации и ремонта в жилых и производственных помещениях. – Саранск: Изд-во Мордовского ун-та. – 2017. – 170 с.
5. Зарипова З. К. Применения композитной арматуры на основе базальтового волокна в современном строительстве // Вестник науки. 2025. №2 (83).
6. Устинов О.В., Сулейманов Р.Д., Гурьева В.А. Проблемы применения композитной арматуры в строительстве // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры, материалы Всероссийской



научно-методической конференции. Оренбургский государственный университет. 2017.

7. Меркулов С. И., Есипов С. М., Есипова Д. В. Композитные системы внешнего армирования железобетонных конструкций // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова. 2022. №4.

8. Al-Kharabsheh B.N., Arbili M.M., Majdi A., Alogla S.M., Hakamy A., Ahmad J., Deifalla A.F. Basalt Fibers Reinforced Concrete: Strength and Failure Modes // Materials. 2022. Vol. 15, No. 20. Art. 7350. DOI: 10.3390/ma15207350.

9. Al-Kharabsheh B.N., Arbili M.M., Majdi A. et al. Basalt Fiber Reinforced Concrete: A Compressive Review on Durability Aspects // Materials. 2023. Vol. 16, No. 1. Art. 429. DOI: 10.3390/ma16010429.

10. Vatin N.I., Hematibahar M., Gebre T.H. Impact of basalt fiber reinforced concrete in protected buildings: a review // Frontiers in Built Environment. 2024. Vol. 10. DOI: 10.3389/fbuil.2024.1407327.

11. Степанова В. Ф. Арматура композитная полимерная / В. Ф. Степанова, А. Ю. Степанов, Е. П. Жирков. – М. : Изд-во АСВ, 2013. – 200 с.

12. Ductility and flexure of lightweight expanded clay basalt fiber reinforced concrete slab / V. V. Galishnikova, A. Heidari, P. C. Chiadighikaobi [et al.] // Structural Mechanics of Engineering Constructions and Buildings. – 2021. – Vol. 17, No. 1. – P. 74-81. – DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-1-74-81. – EDN QVBJJP.

13. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. №3.

14. Рубин О.Д., Лисичкин С.Е., Зюзина О.В. Прочность малоармированных железобетонных конструкций с межблочными строительными швами, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой // Природообустройство. 2021. №1.

15. Ерофеев В.Т., Ельчищева Т.Ф. Влажностный режим помещений зданий при наличии в материале стен гигроскопических солей // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – № 12 (720). – С. 62–74.

16. Шарифов А.Х., Ивашенко Ю., Рахмонзода А. Экспериментальные исследования прочности, жесткости и трещиностойкости облегченных плит с комбинированным армированием // Вестник ЮУрГУ. Серия: Строительство и архитектура. 2021. №4.

17. Ступишин Л.Ю., Масалов А.В., Савельева Е.В. Методика испытаний композитного армирующего

стержня на основе базальтовой комплексной нити. Строительство и реконструкция. 2021;(1):50-64. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2021-93-1-50-64>

18. Ахмедов Ш.Б., Мирзаолимов И.Ю. Технико-экономическое обоснование применения базальтовой арматуры при строительстве мостовых сооружений: технико-экономическое обоснование применения базальтовой арматуры при строительстве мостовых сооружений. Железнодорожный транспорт: актуальные вопросы и инновации, 4(4), 34-41. (2024)

19. Козеева О.О. Многокритериальный анализ и выбор параметров геоинформационной модели расположения объектов и инфраструктуры городского пространства // Информация и космос. 2022. № 4. С. 136-143.

20. Нефедов А. С., Шакиров В. А., Игнатьева С. М. Многокритериальный выбор структуры генерирующих мощностей локальных энергосистем на основе модифицированного метода анализа иерархий // Вестник ИрГТУ. 2022. №3 (164).

21. Tarek S. Analytical Hierarchical Process (AHP) as a decision-making model for retrofitting ordinary buildings into smart buildings // Journal of Engineering Science and Military Technologies. 2021. Vol. 5, no. 2. P. 63–69. DOI: 10.21608/ejmtc.2022.137802.1219.

22. Belay S., Goedert J., Woldesenbet A., Rokooei S. AHP based multi criteria decision analysis of success factors to enhance decision making in infrastructure construction projects // Cogent Engineering. 2022. DOI:10.1080/23311916.2022.2043996

23. Метод анализа иерархий [Электронный ресурс] : учебно-методический материал. URL: <https://www.hse.ru/mirror/pubs/share/204810376> (дата обращения: 10.03.2026)

24. Maceika A., Bugajev A., Šostak O.R., Viliutienė T. Decision Tree and AHP Methods Application for Projects Assessment: A Case Study // Sustainability. 2021. Vol. 13. No. 10. Art. 5502. DOI: 10.3390/su13105502.

25. Theilig K., Vollmer M., Lang W., Albus J. Multi-criteria decision-making for energy building renovation: Comparing exterior wall structures with the AHP, ANP, utility analysis, and TOPSIS // Building and Environment. 2025. Vol. 280. Art. 113075. DOI: 10.1016/j.buildenv.2025.113075.

26. Więckowski J., Sałabun W. A new sensitivity analysis method for decision-making with multiple parameters modification // Information Sciences. 2024. Vol. 678. Art. 120902. DOI: 10.1016/j.ins.2024.120902.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 25.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 25.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 691.328

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.5 Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2026_2_81

ОСОБЕННОСТИ ПРОИЗВОДСТВА СБОРНЫХ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С БАЗАЛЬТОВЫМ АРМИРОВАНИЕМ

© Авторы, 2026
SPIN: 7984-8836

БУЛГАКОВ Алексей Григорьевич
доктор технических наук, профессор
НИИСФ РААСН
(Россия, Москва, e-mail: agi.bulgakov@mail.ru)

SPIN:

СЕРГЕЕВА Ирина Владимировна
кандидат технических наук, доцент
МГСУ
(Россия, Москва)

SPIN:

АСЕЕВ Вячеслав Юрьевич
аспирант
Юго-Западный государственный университет
(Россия, Курск)

SPIN: 5316-5749

ТАРАКАНОВ Олег Вячеславович
доктор технических наук, профессор
Пензенский государственный университет архитектуры и строительства
(Россия, Пенза)

SPIN: 1041-9513

АНПИЛОВ Сергей Михайлович
Заслуженный изобретатель РФ, д.т.н., Почетный профессор НГАСУ (СИБСТРИН),
ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных конструкций
кафедры ЖБК
НГАСУ (СИБСТРИН)
(Россия, Новосибирск)

SPIN: 5201-3550

ШУБИН Игорь Любимович
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор,
Заслуженный строитель РФ, директор
НИИСФ РААСН
(Россия, Москва)

Аннотация. Последние годы теоретически и экспериментальные исследования в области создания композиционных материалов способствовали созданию получению строительных материалов и конструкции способных конкурировать со строительной сталью. В данной статье представлены основные принципы проектирования сборных конструкций из бетона, армированного базальтовыми волокнами, а также рассмотрены технологические особенности их изготовления. Для заводского производства бетонных плит описаны два способа размещения базальтового композитного армирования. Один из них основан на применении изготовленных в заводских условиях армирующих сеток типовых размеров с заданными параметрами армирования, поставляемых на предприятие сборного железобетона. Второй способ предусматривает использование роботизированной системы, формирующей армирование путем укладки непрерывной нити непосредственно в опалубочную форму по заданной траектории. Роботизированная укладка обеспечивает точное позиционирование армирования в соответствии с заданной конфигурацией, что повышает эффективность использования материала.

Ключевые слова: бетон; базальт; армирование; производство бетонных плит; роботизация

Благодарности: работа финансировалась Министерством науки и высшего образования РФ, проект № FSWG-2026-0003; Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, проект РААСН № 124042400059-1.



Для цитирования: Особенности производства сборных бетонных конструкций с базальтовым армированием/ А.Г. Булгаков, И.В. Сергеева, И.В. Сергеева, О.В. Тараканов, С.М. Анпилов, И.Л. Шубин // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 81-88. doi:10.51608/26867818_2026_2_81.

Original article

FEATURES OF THE PRODUCTION OF PRECAST CONCRETE STRUCTURES WITH BASALT REINFORCEMENT

©The Author(s) 2026

BULGAKOV Alexey Grigorievich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
Research Institute of building physics (NIISF)
(Russia, Moscow)

SERGEEVA Irina Vladimirovna

Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor
National Research Moscow State University of Civil Engineering
(Russia, Moscow)

ASEEV Vyacheslav Yurievich

PhD Candidate
Ufa State Petroleum Technological University
(Russia, Ufa)

SHUBIN Igor Lyubimovich

Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical, Prof., director
Research Institute of building physics (NIISF)
(Russia, Moscow)

ANPILOV Sergey Mikhailovich

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical,
Honorary Professor of SIBSTRIN, Leading Researcher at the Testing Center
for Building Structures at the Department of Concrete Structures
Novosibirsk State Architectural and Construction University
(Russia, Novosibirsk)

TARAKANOV Oleg Vyacheslavovich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
Penza State University of Architecture and Construction
(Russia, Penza)

Abstract. In recent years, theoretical and experimental research in the field of composite materials has led to the development of building materials and structures that can compete with construction steel. This article presents the basic design principles of precast concrete structures reinforced with basalt fibers and discusses the manufacturing process. Two methods for placing basalt composite reinforcement are described for the factory production of concrete slabs. One method is based on the use of factory-made reinforcing meshes of standard sizes with specified reinforcement parameters, supplied to the precast concrete plant. The second method involves the use of a robotic system that forms the reinforcement by placing a continuous strand directly into the formwork along a specified path. Robotic placement ensures precise positioning of the reinforcement according to the specified configuration, increasing material efficiency.

Keywords: concrete; basalt; reinforcement; production of concrete slabs; robotics

Acknowledgments: The work was funded by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project no. FSWG-2026-0003; the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation, project RAASN no. 124042400059-1.

For citation: Features of the production of precast concrete structures with basalt reinforcement/ A.G. Bulgakov, I.V. Sergeeva, V.Yu. Aseev, O.V Tarakanov., S.M. Anpilov, I.L. Shubin // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 81-88. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_81.

Введение. Последние годы теоретические и экспериментальные исследования в области композиционных материалов способствовали созданию и получению строительных материалов и конструкции способных конкурировать со строительной сталью, в связи с более низкой их стоимостью по сравнению со сталью и вследствие высокого спроса на прочный бетон [1-4]. Значительную прочность на разрыв и ударную прочность имеют дисперсно армированные бетоны [5-8]. Применение базальтового волокна в качестве армирующего материала является альтернативой стандартным стальным стержням, а также полипропиленовым волокнам или сеткам на их основе в бетонных конструкциях [9-10]. Снижение или отсутствие коррозии у такого армирующего материала позволяет минимизировать толщину защитного слоя бетона, использовать конструкции в агрессивных средах и обеспечивать большую долговечность по сравнению с традиционным железобетоном со стальной арматурой. Базальтовые волокна обладают высокими показателями прочности и модуля упругости (рис. 1), превосходя многие другие волокнистые композиты, а также проявляют устойчивость в щелочной среде бетона при типичных значениях pH (рис. 2) [11]. Габариты элементов армированного базальтовым волокном бетона удастся уменьшить без снижения несущей способности, что делает материал ценным с точки зрения повышения экологичности и снижения расходов строительных ресурсов [11-12].



Рис. 1. График «напряжение-деформация» для базальтовой арматуры при продольном изгибе стержня [11]

Диаметр одного базальтового волокна составляет всего 5–10 мкм, поэтому по технологическим соображениям волокна собирают в пряжу. Для устранения проблемы слабого сцепления внутренних волокон с матрицей пряжу тщательно пропитывают, в том числе полимерами, формируя нить. Эффективность пропитки определяет равномерность деформаций между слоями волокон и, соответственно, общую прочность на растяжение (рис. 3).

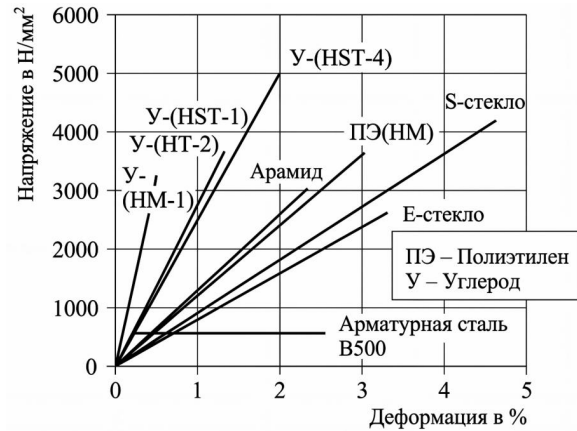


Рис. 2. Графики «напряжение-деформация» для различных волокнистых материалов в сравнении с арматурной сталью НМ-1 – высокомодульное углеволокно; HT-2 – высокопрочное по растяжению углеволокно, HST-1, HST-4 – высокопрочное углеволокно; ПЭ(НМ) – полиэтилен *высокомодульный. *высокомодульный – с повышенными показателями модуля Юнга

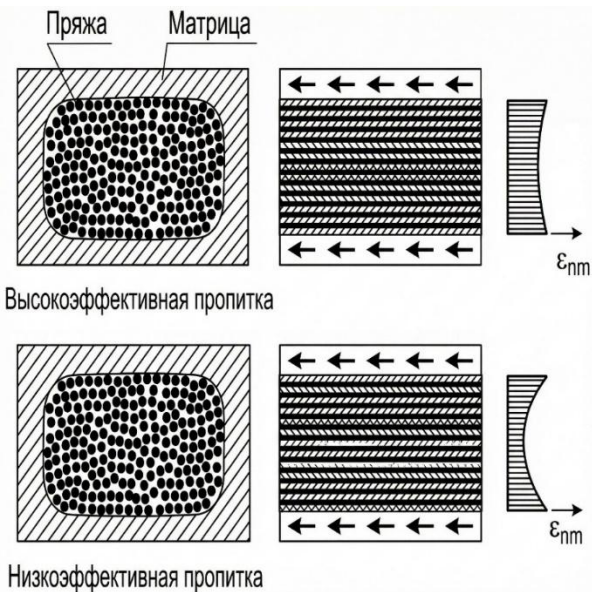


Рис. 3. Влияние пропитки на распределение деформаций в сечении базальтовых нитей

Неравномерность нагрузки резко снижает физико-механические характеристики материалов. Проверенными пропитками являются эпоксидные смолы и стирол-бутадиеновый каучук [7; 13-14]. Предлагаются также варианты применения для этого полиэфирных [15-16], винилэфирных [17-19] и карбамидных [20]. Минеральные варианты, которые изучаются, перспективны для экстремальных температур [21]. Полимерные нити обычно служат базой для армирующих систем в бетоне. Их основными



вариантами являются: плоские сетки с двух- или многоосной ориентацией волокон, объемные сетки, стержневые профили и преднапряженные элементы (рис. 4).

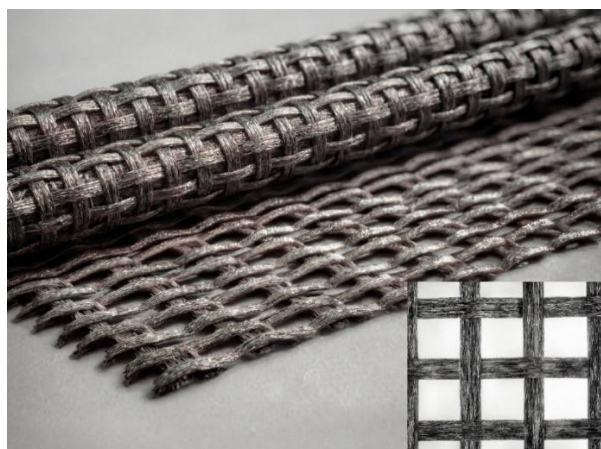


Рис. 4. Пример базальтовой арматурной пряжи

Поскольку полимерные базальтовые нити представляют собой композит из базальтовых волокон и пропиточного вещества, их разрывная прочность уступает показателям чистых базальтовых волокон. Хотя армированный базальтовым волокном бетон является относительно новым конструктивным решением, он уже нашел широкое применение в производстве сборных бетонных изделий и при усилении находящихся в эксплуатации железобетонных сооружений [21].

Методы и материалы. В настоящее время основные строительные нормы для железобетонных конструкций подходят только для стального стержневого или сеточного усиления. За рубежом существуют нормативные документы по неметаллическим армирующим материалам – ACI 440.1R-15 [22] и fib[23-24].

Известно, что в ближайшем будущем в обновленном Еврокоде 2 [25] будет добавлена глава о неметаллическом армировании. Национальные приложения к нему для отдельных европейских стран дорабатываются. По существующим оценкам, через 1–2 года нормы вступят в силу, что упростит проектирование и возведение изделий из армированного базальтовым волокном бетона.

Зарубежные рекомендации по созданию и монтажу бетона с неметаллическим усилением уже действуют [26] и используются в многочисленных объектах. Они основываются на Еврокоде 2 [27], дополняя его лишь необходимыми данными для перехода к неметаллическому армированию. Безопасность обеспечивается расчетом конструкций методом частичных коэффициентов [27]. Для бетона применяются значения из EN 1992-1-1.

Для неметаллического усиления установлен коэффициент $\gamma_{nm}=1,3$ при расчетах предельного со-

стояния по несущей способности [28]. Все параметры материалов базируются на их конкретных технических характеристиках в каждом отдельном случае, так как унифицированных норм пока не существует. Они включают в себя характеристику прочности на разрыв, $f_{nm,k}$, модуль упругости, E_{nm} , коэффициент снижения, α_{nmt} , для длительных нагрузок и свойства сцепления (таблица 1). Важным является уточнение, относится ли $f_{nm,k}$ к полному сечению композита или только к площади базальтовых волокон.

Таблица 1 – Механические свойства базальтовых сеток согласно DIBt [29]

Механические свойства	Значения
Прочность на растяжение пропитанного волокна, $f_{nm,k}$ (МПа)	1250
Модуль упругости пропитанного волокна, E_{nm} (МПа)	99000
Коэффициент снижения, α_{nmt}	0,83

Диаграмма «напряжение–деформация» неметаллического армирования демонстрирует линейную зависимость (рис. 5).

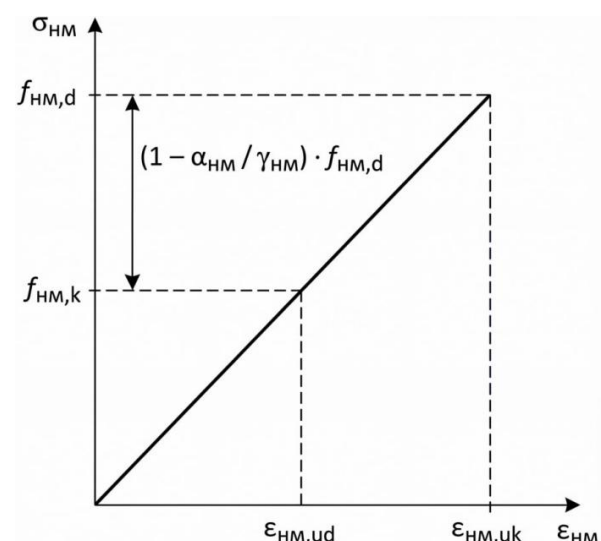


Рис. 5. Диаграмма «напряжение–деформация» для неметаллического армирования [28, 29]

Расчетная прочность на растяжение $f_{nm,d}$ определяется по формуле:

$$f_{nm,d} = \frac{\alpha_{nmt} \cdot f_{nm,k}}{\gamma_{nm}} \quad (1)$$

Предельная деформация $\epsilon_{nm,ud}$ не должна быть меньше 0,005 и определяется из выражения [11]:

$$f_{nm,d} = \frac{\alpha_{nmt} \cdot f_{nm,k}}{\gamma_{nm}} \quad (2)$$

Если нейтральная ось расположена внутри сечения, предельные состояния определяются одним или обоими из приведенных ниже условий:

– деформация ϵ_{c2} на сжатой стороне сечения равна предельной деформации ϵ_{cu2} согласно [25]. Для бетона нормальной прочности справедливо равенство: $\epsilon_{cu2} = 0,0035$;

– деформация в неметаллической арматуре ε_{nm} равна предельной деформации $\varepsilon_{nm,ud}$. Для значений материала, приведенных в Таблице 1, $\varepsilon_{nm,ud}$ можно рассчитать как:

$$\varepsilon_{nm,ud} = \frac{(\alpha_{nmt} \cdot f_{nm,k} / \gamma_{nm})}{E_{nm}} = 0.008. \quad (3)$$

Это более низкая предельная деформация по сравнению со стальной арматурой, для которой она составляет 0,025.

Если неметаллическая арматура расположена в сжатой зоне бетона, то его сопротивление снижается из-за ее наличия. Этот эффект необходимо учитывать при коэффициентах армирования $\rho_t > 2,5\%$ путем снижения расчетного сопротивления бетона сжатию f_{cd} до $f_{cd,red}$:

$$f_{cd,red} = \left(1 - \frac{A_{c,nm}}{A_{c,c}}\right) \cdot f_{cd}. \quad (4)$$

где $A_{c,nm}$ – площадь поперечного сечения неметаллической арматуры в сжатой зоне, $A_{c,c}$ – площадь сжатой зоны бетона и $\rho_t = A_{c,nm} / A_{c,c}$.

В значении $A_{c,nm}$ должна учитываться продольная и поперечная неметаллическая арматура.

При использовании базальтового армирования нет необходимости в защитном слое бетона $c_{min,dur}$ для обеспечения долговечности. Тем не менее, техническое допущение может устанавливать ограничения по классам воздействия среды. Они касаются минимального защитного слоя c_{min} и номинального c_{nom} :

$$c_{min} = \max(c_{min,b}, 5 \text{ мм}). \quad (5)$$

$$c_{nom} = c_{min} + \Delta c_{dev}. \quad (6)$$

где $c_{min,b}$ – минимальный защитный слой для обеспечения сцепления, Δc_{dev} – допуск проектного отклонения.

При возведении новых конструкций, допустимы значения $\Delta c_{dev} = 10$ мм для защитного слоя $d \geq 150$ мм и $\Delta c_{dev} = 5$ мм при $d < 150$ мм. При строгом контроле качества проектирования и монтажа Δc_{dev} можно еще несколько снизить. Таким образом, минимальная толщина плиты из армированного базальтовым волокном бетона h_{slab} достигается при размещении в ее середине одной плоской сетки и составляет около 30 мм.

Для расчетов изгиба сверхтонких элементов расчетную высоту d корректируют до d_{eff} , учитывая повышенное влияние допусков на позицию неметаллической арматуры для точной оценки несущей способности:

$$d_{eff} = \frac{(d - 4)}{(66/70)} \text{ для } d \leq 70 \text{ мм}. \quad (7)$$

$$d_{eff} = d \text{ для } d > 70 \text{ мм}. \quad (8)$$

Результаты расчетов на изгиб с параметрами материалов, представленными в табл. 1, приведены на рисунках 6 и 7.

Влияние прочности бетона на изгибающую способность остается минимальным. Это обусловлено тем, что предельные деформации возникают в

неметаллической арматуре, а не в сжатой зоне бетона. Поэтому повышенные марки бетона, типичные для заводских изделий, не приносят заметных плюсов при оценке изгиба.

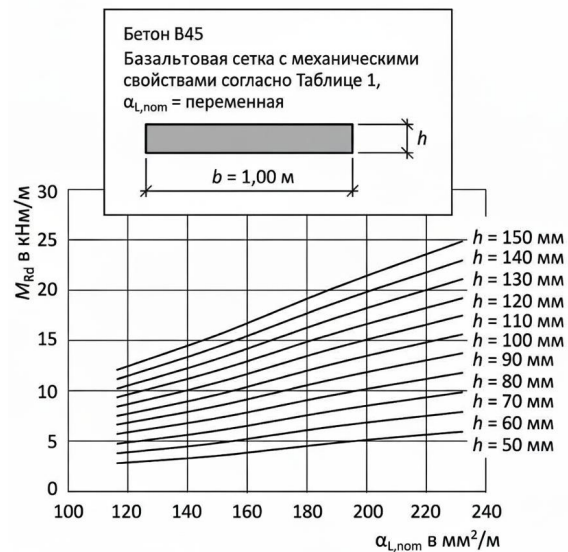


Рис. 6. Расчетное значение момента сопротивления изгиба сечения CRC в зависимости от высоты плиты h

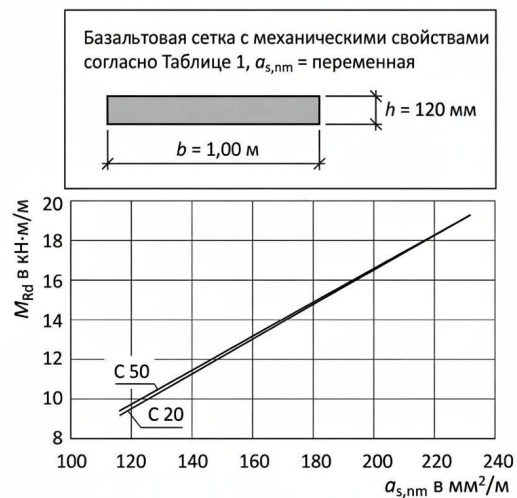


Рис. 7. Влияние прочности бетона на расчётное значение несущего момента изгиба сечений из бетона, армированного базальтовым волокном

Важно учитывать, что разрывная прочность базальтового армирования падает под боковым давлением, особенно в криволинейных зонах. Исследования подтверждают резкое снижение характеристик при радиусе изгиба арматуры ниже 80 мм [30, 31]. Эксперименты выявили, что прочность на растяжение текстильных элементов в местах изгиба может падать до 40 % от нормы в сложных условиях (рис. 8). Учитывая возможность создания ультратонких форм из армированного базальтовым волокном бетона, такие как углы и кромки, требуют особо точного проектирования и изготовления.

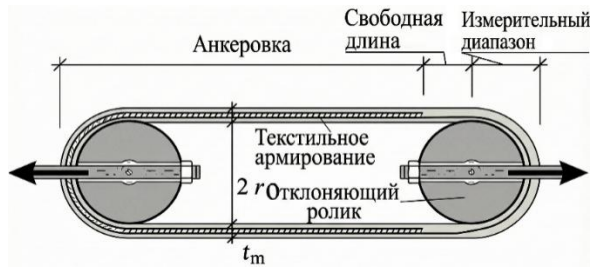


Рис. 8. Принцип испытания изогнутой текстильной арматуры по методу Мессерера и Хольшмаера [30, 31]

При производстве сборных бетонных изделий требуется оперативная распалубка, поэтому часто выбирают марки бетона с повышенной прочностью сверх расчетных параметров. Однако такая практика, удобная для ускорения формования, чревата проблемами: рост прочности на растяжение бетона увеличивает объем минимального армирования. В этом контексте особенно опасно, если фактическая прочность материала превысит проектные значения.

Результаты. При изготовлении армированных базальтовым волокном бетонных плит на предприятиях строительной индустрии используют два подхода: послойное нанесение и одноступенчатую заливку. При послойном методе сначала формируют базовый слой бетона, затем монтируют армирующие компоненты и накрывают их верхним слоем смеси. Плотность базальтового армирования ниже бетонной, поэтому при одноступенчатой заливке существует опасность проседания арматуры в сырой массе, которую устраняют с помощью удерживающих креплений [32-33].

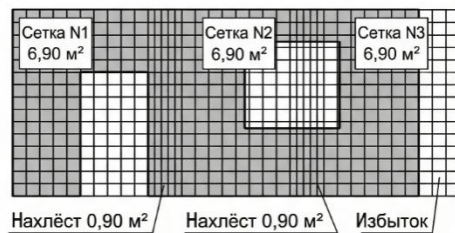
Обычно базальтовая арматура готовится заранее и доставляется в виде жестких плоских сеток или рулонных материалов на заводах ЖБИ, где ее вручную позиционируют в соответствии с проектными параметрами. Стандартные габариты сеток (6,00 x 2,30 м) требуют подрезки, что означает появление излишков и нежелательных отходов. Например, для стены площадью 14,0 м² рулонной базальтовой арматурой шириной 2,30 м нужно 20,7 м² материала (рис. 9), из которых 6,70 м² (48 %) уйдут в отход. В этом случае становится понятно, что для ресурсосбережения, экологичности и рентабельности нужны эффективные способы позиционирования неметаллической арматуры.

Роботизация процесса намотки армирующего базальтового волокна в опалубочной форме позволяет повысить производительность труда и качество готовой продукции [34].

Манипулятор берет нить с бобины, пропускает ее для пропитки в специальной емкости и после просушки в предназначенной для этого камере в течение 15 мин укладывает ее в опалубочную форму (рис. 10). На формовочном столе фиксируют направляющие ролики магнитами или рамой. Приобретшая необходимую жесткость нить обматывается вокруг



Размещение сетки №1



Окончательное расположение сеток

Рис. 9. Пример армирования стены с использованием сборных сеток

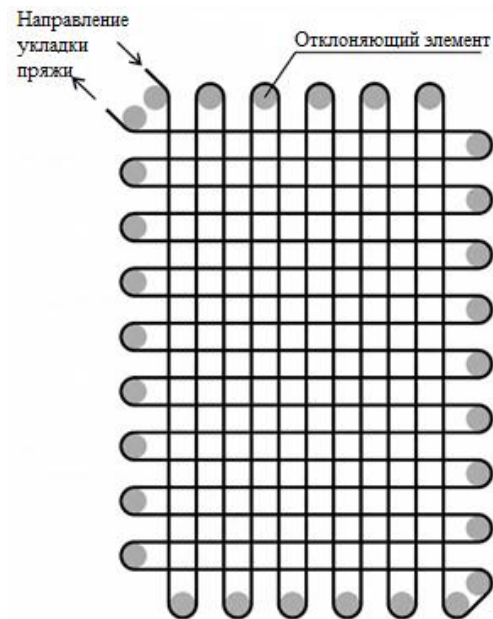


Рис. 10. Принцип автоматизированной вязки базальтовой арматуры

них, формируя многоосный каркас армирования. Такой способ производства является более эффективным по сравнению с использованием готовых сеток, изготовленных в другом месте. Армирование осуществляется строго по потребности и без отходов. Возможно, без дополнительных затрат времени и средств усиливать зоны проемов, углов и краев изготавливаемой бетонной плиты. Плотность армирования



ния повышают, сокращая расстояние между ролями или добавляя тем самым слои усиления.

Заключение. Армированный базальтовым волокном бетон представляет собой передовой строительный композит, применение которого стремительно расширяется при реконструкции и санации промышленных и гражданских зданий и сооружений. Зарубежный опыт показывает, что появление технических норм и рекомендаций для строительных конструкций с неметаллическим усилением упрощают разработку конструктивных систем из армированного базальтовым волокном бетона, что стимулирует рост внимания к нему со стороны строительной отрасли.

Существенное повышение производительности труда и качества выпускаемых бетонных изделий из композитных материалов обеспечивается за счет внедрения автоматизированного производства с роботизацией процесса укладки базальтовой нитив опалубочные формы. При этом появляется возможность без трудоемкой переналадки оборудования переходить с одного вида продукции на другой. В дальнейшем возможна интеграция производства с системами информационного моделирования строительства (BIM) и достижение высокой индивидуальности строительных сооружений как при реконструкции, так и в новом строительстве без снижения темпов и с безупречным качеством выполнения работ.

Библиографический список

1. Ерофеев В.Т., Меркулов И.И., Меркулов А.И., Ерофеев П.С. Оптимизация составов бетонов с применением численного моделирования. Саранск, 2006.
2. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Жарин Д.Е. Основы формирования структуры композиционных материалов. Саранск, 2012.
3. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Мороз М.Н., Троянов И.Ю., Володин В.М., Суздальцев О.В. Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов // Строительные материалы. 2014. № 5. С. 88-91.
4. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Тараканов О.В. Суспензионно-наполненные бетонные смеси для порошково-активированных бетонов нового поколения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2016. № 4 (688). С. 30-37.
5. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов / Ю. В. Пухаренко // Строит. материалы. – 2004. – № 10. – С. 47–50.
6. Леонович С. Н. Технология и свойства фибробетона с наномодифицированной матрицей / С. Н. Леонович, Е. А. Садовская. – М. : Инфра-М. – 2024. – 194 с.
7. Армированные каркасные композиты для зданий и сооружений: монография / В. Т. Ерофеев, В. И. Римшин, В. Ф. Смирнов [и др.]; под общ. ред. В. Т. Ерофеева, В. И. Римшина, В. Ф. Смирнова. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2015. – 360 с.
8. Волков И. В. Проблемы применения фибры в отечественном строительстве / И. В. Волков // Строительные материалы. – 2004. – № 6. – С. 12–13.

9. Lesovik R.V., Klyuyev S.V., Klyuyev A.V., (...), Yerofeyev V.T., Durachenko A.V. Fine-grain concrete reinforced by polypropylene fiber // Research Journal of Applied Sciences. – 2015. – 10(10). – P. 624–628.

10. Кычкин А.К., Васильева А.А. Исследование физико-механических характеристик композиционных арматурных стержней, изготовленных на основе базальтового ровинга // Вестник СВФУ. 2012.

11. Curbach et al. (2024). New perspectives on carbon reinforced concrete structures – Why new composites need new design strategies. *CivilEngineeringDesign*, 2025, 5, 67–94. <https://doi.org/10.1002/cend.20220008>.

12. Рабинович Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов: вопросы теории и проектирования, технология, конструкции / Ф. Н. Рабинович; предисл. И. Н. Фридляндера, Е. П. Велихова. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва: Ассоц. строит. вузов, 2011. – 639 с.

13. Erofeev V.T., Ivlev V.I., Sigachyov A.F., Fomin N.E., Yudin V.A., Blohin A.N., Yel'chishcheva T.F., Suhorukov A.K., Tkachev A.G. Mechanical properties of epoxy resin with additives soot and nanotubes // *Materials Physics and Mechanics*. – 2021. – Т. 47. № 1. – P. 20–30.

14. Гаврилов М.А., Ерофеев В.Т. Реологические свойства эпоксидных композитов, модифицированных жидким каучуком // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 3 (52). – С. 53–57.

15. Ерофеев В.Т., Ивлев В.И., Мышкин А.В., Юдин В.А., Ельчищева Т.Ф., Сигачев А.Ф. Механические свойства отвержденной полиэфиракрилатной смолы МГФ-9 // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. – 2021. – № 6 (396). – С. 311–319.

16. Мышкин А.В., Ерофеев В.Т. Оптимизация составов полиэфиракрилатных композитов // Региональная архитектура и строительство. – 2013. – № 3. – С. 56–61.

17. Ерофеев В.Т., Волгина Е.В., Ерыкалина И.В., Казначеев С.В. Оптимизация содержания отверждающих компонентов в винилэфирных композитах // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2011. – № 5-2 (38). – С. 427–433.

18. Волгина Е.В., Казначеев С.В., Ерофеев В.Т., Кротова В.М. Деформативность винилэфирных композитов // Известия Юго-Западного государственного университета. – 2012. – № 6 (45). – С. 82–90.

19. Ерофеев В.Т., Волгина Е.В., Казначеев С.В., Кротова В.М. Исследование прочности винилэфирных композитов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. – 2013. – № 4. – С. 81-88.

20. Соломатов В.И., Ерофеев В.Т., Яшков В.А., Бикбаев Р.А. Разработка карбамидных полимербетонов с улучшенными свойствами // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2000. – № 1 (493). – С. 33-38.

21. Mechtcherine, V., Michel, A., Liebscher, M., Schneider, K. and Großmann, C. (2020). Mineral-impregnated carbon fiber composites as novel reinforcement for concrete construction: Material and automation perspectives. *Automation in Construction*, 110, 103002. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103002>.

22. ACI 440.1R-15 (2015). Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bars. American Concrete Institute, Farmington Hill, USA.



23. fib (2007). fib Bulletin No. 40, FRP reinforcement in RC structures. Lausanne, Switzerland: Fédération Internationale du Béton.
24. fib (2019). fib Bulletin No. 90, Externally applied FRP reinforcement for concrete structures. Lausanne, Switzerland: Fédération Internationale du Béton.
25. EN 1992-1 (2023). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures. European Committee for Standardization, November 2023.
26. DAFStb (2024). DAFStb guideline for concrete components with non-metallic reinforcement (in German). Berlin, Germany: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton.
27. EN 1992-1-1 (2004). Eurocode 2: Design of Concrete Structures – Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings. European Committee for Standardization, December 2004.
28. Castro Silva, R. and Andrade Silva, F. (2020). Carbon textile reinforced concrete: materials and structural analysis. Springer Nature: Materials and Structural 53:17.
29. DIBt(2024). Deutsches Institut für Bautechnik, National Technical Approval (abZ), No. Z-1.6-308, Carbon reinforcement grids solidating GRID for the reinforcement of concrete components with nonmetallic reinforcement. Berlin, Germany: Deutsches Institut für Bautechnik.
30. Holschemacher, K., Messerer, D. and Heiden, B. (2018). Test Method for Curvature-Dependent Tensile Strength Reduction of Textile Reinforced Concrete (TRC). Proceedings of the 2018 fib Congress, Melbourne, 482–483, October, 2018.
31. Messerer, D., Holschemacher, K. (2022). Effect of curvature on the tensile strength of FRCM. Proceedings of International Structural Engineering and Construction, 9 (1). [https://doi.org/10.14455/ISEC.2022.9\(1\).MAT-11](https://doi.org/10.14455/ISEC.2022.9(1).MAT-11).
32. Holschemacher, K. (2020). Application of Textile Reinforced Concrete in Precast Concrete Industry. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 753, 042086. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/753/4/042086>.
33. Mechtcherine, V., Michel, A., Liebscher, M., Schneider, K. and Großmann, C. (2020). Mineral-impregnated carbon fiber composites as novel reinforcement for concrete construction: Material and automation perspectives. Automation in Construction, 110, 103002. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.103002>.
34. Булгаков А.Г., Хольшемахер К., Асеев В.Ю. Роботизация процесса производства армированных базальтовым волокном бетонных плит. // XI-ая Международная научно-практическая конференция. Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт. Направление конференции «Современные строительные материалы и технологии». – Тамбов: Издательский центр ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2025, с. 328-334.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 23.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 23.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 624.073.5

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.5 Строительные материалы и изделия, 2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818_2026_2_89

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ С ВНЕШНИМ АРМИРОВАНИЕМ

© Авторы, 2026

SPIN: 6994-6436

ЗВЕРЕВ Виталий Валентинович

член-корреспондент РААСН, д.т.н., профессор,
заведующий кафедрой металлических конструкций, Почетный работник
высшего профессионального образования РФ
*Липецкий государственный технический университет; РААСН
(Россия, Липецк, e-mail:kaf-mk@bk.ru)*

SPIN: 9371-7653

РИМШИН Владимир Иванович

член-корреспондент РААСН, д.т.н., профессор
*Московский государственный строительный университет; НИИСФ РААСН
(Россия, Москва, e-mail: v.rimshin@niisf.ru)*

SPIN: 1041-9513

АНПИЛОВ Сергей Михайлович

Заслуженный изобретатель РФ, советник РААСН, д.т.н., Почетный профессор НГАСУ
(Сибстрин), ведущий научный сотрудник испытательного центра строительных
конструкций кафедры ЖБК
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет «Сибстрин»*

SPIN: 3476-1081

ЖИДКОВ Константин Евгеньевич

кандидат технических наук, доцент
*Липецкий государственный технический университет
(Россия, Липецк)*

SPIN: 5585-2510

МАРКОВИЧ Александр Живорадович

ассистент кафедры
*Липецкий государственный технический университет
(Россия, Липецк)*

Аннотация. Представлены результаты натурных испытаний сталежелезобетонной плиты с использованием гнутых профилей с трапециевидными гофрами в качестве несъемной опалубки и внешнего армирования. Разработана методика экспериментальных исследований, схемы загрузки и расстановки приборов. Выявлены особенности деформирования и разрушения конструкции при действии равномерно-распределенной нагрузки. Выполнен анализ напряженно-деформированного состояния на различных этапах загрузки. Проведено сравнение экспериментальных данных с теоретическими значениями. На основании результатов проведенных исследований дана оценка возможности практического применения при строительстве зданий и сооружений различного назначения.

Ключевые слова: несъемная опалубка; сталежелезобетонная плита; тонколистовые гнутые профили; натурный эксперимент; напряженно-деформированное состояние

Для цитирования: Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния сталежелезобетонной плиты с внешним армированием / В.В. Зверев, В.И. Римшин, С.М. Анпилов, К.Е. Жидков, А.Ж. Маркович // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 89-96. doi:10.51608/26867818_2026_2_89.



Original article

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRESS-STRAIN STATE OF STEEL-REINFORCED CONCRETE SLABS
WITH EXTERNAL REINFORCEMENT

© The Author(s) 2026

ZVEREV Vitaly Valentinovich

Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical Sciences, Prof., Head of the Department of Metal Structures
Lipetsk State Technical University; RAACS
(Russia, Lipetsk)

RIMSHIN Vladimir Ivanovich

Corresponding Member of RAACS, Dr. of Technical Sciences, Prof.
MGSU, Research Institute of building physics (NIISF)
(Russia, Moscow)

ANPILOV Sergey Mikhailovich

Honored Inventor of the Russian Federation, Advisor to RAACS, Dr. of Technical, Honorary Professor of SIBSTRIN, Leading Researcher at the Testing Center for Building Structures at the Department of Concrete Structures
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)
(Russia, Novosibirsk)

ZHIDKOV Konstantin Evgenievich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Lipetsk State Technical University
(Russia, Lipetsk)

MARKOVICH Alexander Zhivoradovich

Assistant
Lipetsk State Technical University
(Russia, Lipetsk)

Abstract. The results of field tests of steel-reinforced concrete slabs using bent profiles with trapezoidal corrugations as permanent formwork and external reinforcement are presented. A method of experimental research, schemes of loading and arrangement of devices have been developed. The features of deformation and destruction of the structure under the action of a uniformly distributed load are revealed. The stress-strain state is analyzed at various stages of loading. The experimental data are compared with the theoretical values. Based on the results of the conducted research, an assessment of the possibility of practical application in the construction of buildings and structures for various purposes is given.

Keywords: non-removable formwork; reinforced concrete slab; thin-sheet bent profiles; field experiment; stress-strain state

For citation: Experimental studies of the stress-strain state of steel-reinforced concrete slabs with external reinforcement / S.V. Barcovskaya, A.V. Prokhorova // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 89-96. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_89.

Введение. Одним из эффективных технических решений перекрытий зданий и сооружений различного назначения является применение монолитных сталежелезобетонных конструкций с использованием стального профилированного оцинкованного тонколистового проката. Помимо технологических функций опалубки при выполнении соответствующих условий стальной лист выполняет функцию внешней рабочей арматуры.

Основными достоинствами перекрытий данного типа являются снижение собственной массы перекрытия на 20...30%, уменьшение высоты плиты, отсутствие необходимости в установке инвентарной опалубки, снижение транспортных расходов и затрат на грузоподъемные механизмы по сравнению с вариантом из сборных железобетонных плит в связи с компактностью исходных материалов (профлист, арматура, бетон). Наибольший экономический эффект

от применения сталежелезобетонных плит наблюдается в стеснённых условиях строительства.

Устройство сталежелезобетонной (СЖБ) плиты предполагает выполнение монолитных железобетонных работ по несъемной опалубке. На этапе бетонирования несущей конструкцией является несъемная опалубка, которая может быть выполнена в виде профиля из тонколистового проката. В данном случае ЛСТК выступает еще в роли матрицы-формы, обеспечивающей оптимальную форму поперечного сечения плиты.

В случае включения в работу стального листа опалубки в качестве внешнего армирования несущая способность плиты значительно увеличивается за счет его работы на растяжение. Современные технологии холодного профилирования позволяют изготовить настил с продольными элементами жесткости, которые повышают несущую способность стального профиля. Создание дополнительных поперечных рифов на поверхности стального профиля увеличивает прочность сцепления настила с бетоном плиты на стадии эксплуатации, таким образом несъемная опалубка частично включается в совместную работу с ж.б. плитой.

Большое количество исследований сталежелезобетонных конструкций позволило разработать нормативный документ по расчету конструкций данного типа- СП 266.1325800.2016 [1].

Необходимость разработки конструктивных решений, обладающих большей несущей способностью и возможностью перекрывать большие пролеты, требует уточнения расчетных положений нормативной документации.

Различают два подхода для подтверждения теоретических предпосылок расчета:

- метод имитационного моделирования. В современных программных комплексах позволяет получать данные с достаточной степенью достоверности о напряженно-деформированном состоянии элементов [2-9];

- экспериментальный метод. Позволяет выявить количественные и качественные характеристики в явном виде и позволяет физически определять несущую способность, жесткость и трещиностойкость конструкций [10-16].

Исследования НДС сталежелезобетонной плиты выполнены в рамках Гранта Научно-исследовательского института строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук: 3.1.1.1 Несущая способность сталежелезобетонных конструкций с несъемной опалубкой из настила силового U – образного сечения, сталежелезобетонные конструкции, настил силовой.

Материалы и методы исследования. Для подтверждения теоретических предпосылок расчета были проведены экспериментальные натурные исследования сталежелезобетонной плиты с использованием в качестве несъемной опалубки и внешнего армирования стального объемно-формованного листа (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид образца для испытаний

В рамках поставленной задачи в качестве эффективного элемента внешнего армирования и несъемной опалубки использован линейный объёмно-формованный U-образный элемент

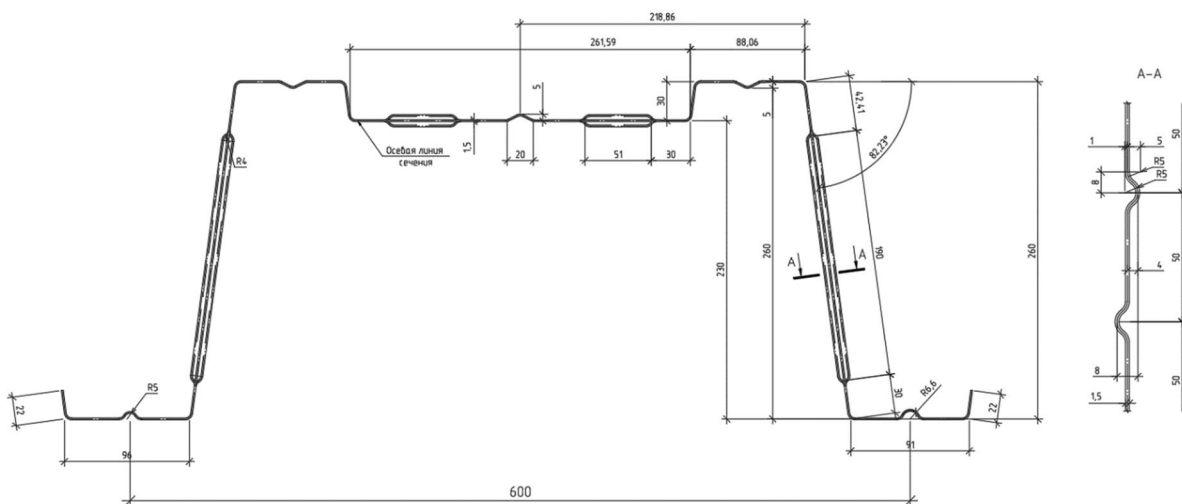


Рис. 2. Линейный объёмно-формованный U-образный элемент



ёмно-формованный настил с поперечным сечением U-образной формы (рис. 2) [17-19].

Для обеспечения сцепления стального профилированного листа и бетона на боковых гранях предусмотрены поперечные рифы высотой 4 мм с шагом 50 мм.

Местная устойчивость полок и стенок обеспечивается продольными промежуточными элементами жесткости, отгибами и сгибами, а также поперечными рифами.



Рис. 3. Ребристая плита с консольными полками



Рис. 4. Контрольные замеры арматуры

Соединение стальных профилей по продольным граням выполняется по нижним полкам самосверлящими самонарезающими винтами. Для предотвращения смятия и деформации сечения в середине пролета и над опорами между стенками установлены ребра жесткости с креплением к основному профилю самосверлящими самонарезающими винтами.

Профили для внешнего армирования и дополнительные элементы выполнены из горячеоцинкованного проката по ГОСТ [20]. Толщина несущего профиля составляет 1,5 мм, ребер жесткости - 1,2 мм.

Для определения фактической марки стали после проведения испытаний были изготовлены образцы, отобранные из наименее нагруженных участ-

ков настила, и определены фактические механические характеристики стали в соответствии с ГОСТ [21]. Предел текучести в результате испытания образцов составил 308 МПа.

Конструкция для испытаний представляет собой ребристую плиту с консольными полками (рис. 3). Толщина полки железобетонной плиты составляет от 60 мм до 90 мм в зависимости от высоты стального профиля (см. рис. 3). Класс бетона в соответствии с сертификатом качества бетонной смеси и по результатам испытания бетонных кубиков по ГОСТ 10180-2012 принят В35. Продольные ребра высотой 320 мм армированы стержнями $\Phi 12$ -А500. Защитный слой арматуры составляет 35 мм (рис. 4). В каждом гофре на опорах установлены гибкие стержневые упоры (4 шт.), выполненные из стальных шпилек диаметром 20 мм.

Испытания железобетонной конструкции выполнялись в соответствии с ГОСТ [22] по балочной однопролётной схеме. Плита опиралась на подвижную и неподвижную шарнирные опоры через стальные пластины толщиной 10 мм (рис. 5).



Рис. 5. Опирание профилированного настила на шарнирно-подвижную опору стенда

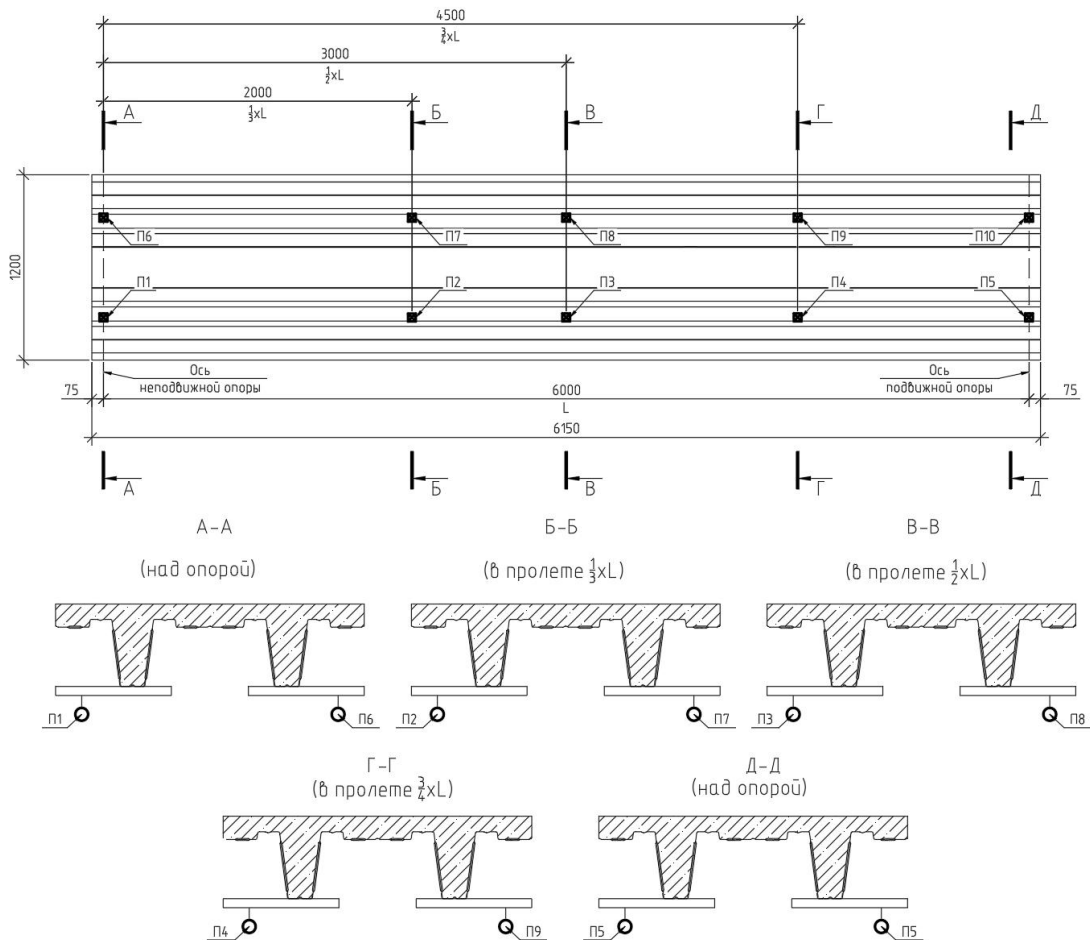


Рис. 6. Схема расположения прогибомеров ПАО-6

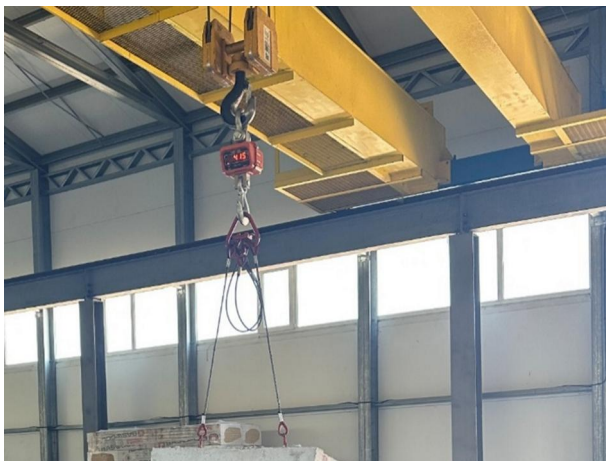


Рис. 7. Контрольное взвешивание бетонных блоков перед загрузкой

Регистрация вертикальных деформаций выполнялась прогибомерами ПАО - 6 с ценой деления 0,01 мм. Схема расположения приборов приведена на рис. 6.

Напряжения в элементах конструкции измерялись с использованием многоканальной тензостанции для статического тензометрирования МС-185.

Загрузка сталежелезобетонной плиты выполнялась фундаментными блоками типа ФБС. Контрольное взвешивание блоков осуществлялось непосредственно перед загрузкой при помощи электронных весов (рис. 7).

Нагрузка прикладывалась от опор к середине пролета с использованием кран-балки грузоподъемностью 10 т.

Нагружение выполнялось в два этапа: предварительный этап и основной.

Предварительный этап был предназначен для оценки корректности работы измерительных приборов, выявления несовершенств и обмятия соединений и опор. Данная нагрузка была принята равной 242 кг/м². Время выдержки после предварительного нагружения составляло 30 мин, после чего была выполнена разгрузка. Дефектов и повреждений, снижающих несущую способность исследуемых элементов, не выявлено.

Нагружение на основном этапе производилось ступенями величиной 10...20 % от теоретической разрушающей нагрузки. Выдержка под нагрузкой на каждом этапе составляла не менее 15 мин или до полной стабилизации показаний приборов.



Результаты исследования. В процессе нагружения деформации и напряжения нарастают равномерно.

График вертикальных деформаций **сталежелезобетонной плиты** в зависимости от нагрузки (без учета собственного веса конструкции – 260 кг/м²) представлен на рис. 8.

свидетельствует о повышенной жесткости исследуемой СЖБ плиты.

На 8 этапе нагружения при нагрузке 2349 кг/м² (рис. 9) вертикальный прогиб в середине пролета достиг 38,37 мм. При дальнейшем нагружении прогибомеры были сняты.

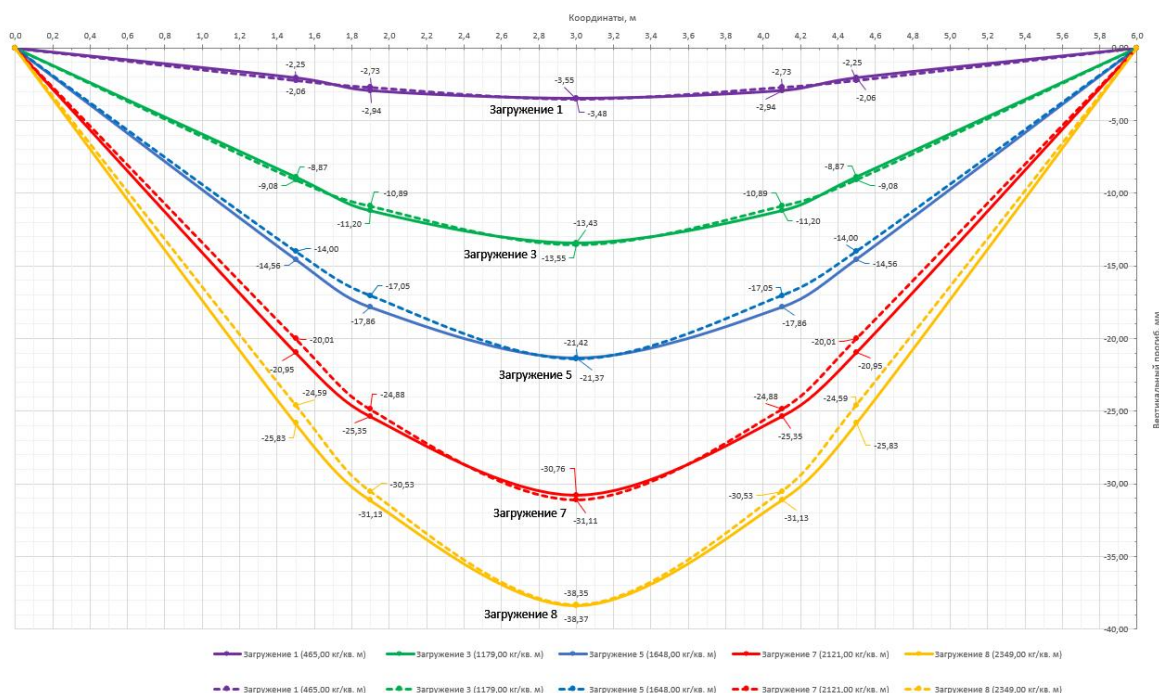


Рис. 8. Вертикальные прогибы сталежелезобетонной плиты



Рис. 9. Прогиб плиты при нагрузке 2349 кг/м²

Вертикальный прогиб $f=31,11$ мм (близкий к предельному вертикальному прогибу 30 мм (по [23]) при испытаниях зафиксирован при нагрузке $q=2121$ кг/м² (7 этап нагружения). При интерполяции установлено, что вертикальный прогиб $f=30$ мм был достигнут при нагрузке 2069,5 кг/м². Теоретический прогиб при данной нагрузке составляет 51,95 мм (больше экспериментального на 42,3%), что свиде-

Признаков, свидетельствующих о недостаточной несущей способности плиты на 8 этапе нагружения, не выявлено.

Сравнение теоретических и экспериментальных прогибов представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение теоретических и экспериментальных прогибов

Нагрузка	Прогибы при соответствующих нагрузках				
	465 кг/м ²	1179 кг/м ²	1648 кг/м ²	2121 кг/м ²	2349 кг/м ²
Теоретическая	11,67 мм	29,59 мм	41,37 мм	53,24 мм	58,96 мм
Экспериментальная	3,55 мм	13,55 мм	21,42 мм	31,11 мм	38,37 мм
Процентное соотношение	69,6 %	54,2 %	48,2 %	41,6 %	35,1 %

При нагрузке 2765 кг/м² (9 этап нагружения) в теле бетона выше несъемной опалубки были зафиксированы вертикальные трещины, не достигающие до границы сжатой зоны бетона (теоретическое значение высоты сжатой зоны бетона - 43,43 мм от верхней плоскости плиты). Ширина раскрытия трещин на уровне верхней полки стального профилированного листа составляет 0,35 мм (рис. 10).



Рис. 10. Вертикальная трещина в теле бетона выше несъемной опалубки при нагрузке 2765 кг/м²

В процессе следующего загрузки (до 3182 кг/м²) произошло увеличение длины вертикальной трещины до сжатой зоны бетона с последующим развитием в горизонтальном направлении. Образовались новые трещины (рис. 11).



Рис. 11. Образование новой вертикальной трещины до сжатой зоны бетона с последующем развитием в горизонтальном направлении в процессе нагружения до 3182 кг/м²

Выводы:

1. Теоретическая несущая способность СЖБ плиты с внешним армированием по расчету в соответствии с [23] – 2167 кг/м².

При натурных испытаниях плиты потеря несущей способности (первая группа предельных состояний) произошла после 8 этапа загрузки при q выше 2765 кг/м² (без учета собственного веса плиты – 286 кг/м² и без учета собственного веса настила – 23,7 кг/м²).

Таким образом, следует считать, что потеря несущей способности произошла при общей (полной) нагрузке $q = 2765 \text{ кг/м}^2 + 286 \text{ кг/м}^2 + 23,7 \text{ кг/м}^2 = 3073,7 \text{ кг/м}^2$.

Фактическая несущая способность выше теоретической на 29,5 %.

2. Экспериментальные прогибы не превышают теоретических значений. При максимальной

нагрузке (8 этап загрузки) экспериментальные деформации меньше теоретических на 35,1 %.

3. Проведенные исследования подтверждают возможность использования сталежелезобетонных плит с внешним армированием из настила силового \bar{U} – образного сечения в качестве несущих конструкций перекрытий и покрытий в зданиях и сооружениях розничного назначения.

Библиографический список

1. СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования: утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 30 декабря 2016 г. N 1030/пр.

2. Ведяков И.И., Соловьев Д.В., Коваленко А.И. Расчет тонколистовых профилированных секций с двойным гофрированием на сжатие с изгибом // Вестник НИЦ Строительство. 2019. № 2(21). С. 5-14.

3. Арменский М.Ю. Опыт использования численных методов в исследованиях геометрических характеристик тонкостенных профилей // Промышленное и гражданское строительство. 2009. № 6. С. 23-26.

4. Подзоров А.В., Зверев В.В., Тезиков Н.Ю. и др. Редуцирование площади поперечного сечения тонкостенного стального профиля при центральной сжатии // Строительная механика и расчет сооружений. 2015. №6(263). С. 24-28.

5. Подзоров А.В., Зверев В.В., Тезиков Н.Ю. и др. Имитационное моделирование напряженно-деформированного состояния тонколистового профилированного элемента с двойным гофрированием // Наука и бизнес: пути развития. 2015. № 5(47). С. 103-105.

6. Зверев В. В., Карманов И. В., Голев Р. В. К вопросу трехмерного и четырехмерного моделирования стального бескаркасного арочного здания // Applied and Fundamental Studies. Proceedings of the 13th International Academic Conference. — Saint-Louis: Publishing House Science and Innovation Center, Ltd. (Saint-Louis), 2017. С. 84-90.

7. Практические подходы к устранению коллизий в информационных моделях зданий / В. И. Римшин, С. М. Анпилов, С. И. Рощина, С. В. Усанов // Эксперт: теория и практика. — 2024. — № 3(26). — С. 87-94. — DOI 10.51608/26867818_2024_3_87. — EDN DHXINT.

8. Римшин, В. И. Применение когнитивных технологий для прогнозирования прочности тонких стенок двутавровых балок / В. И. Римшин, С. М. Анпилов, С. В. Усанов // Эксперт: теория и практика. — 2024. — № 1(24). — С. 42-52. — DOI 10.51608/26867818_2024_1_42. — EDN DEIRZB.

9. Еремеев П.Г., Киселев Д.Б., Арменский М.Ю., Бурлай С.И. Натурные испытания фрагментов панелей из холодногнутых тонколистовых стальных профилей для арочных сводов // Монтажные и специальные работы в строительстве. 2004. № 9. С. 10-13.

10. Ведяков И.И., Арменский М.Ю., Соловьев Д.В. Теоретические и экспериментальные исследования новых марок профилированного настила // Строительная механика и расчет сооружений. 2007. № 2(211). С. 72-74.

11. Семенов А.С., Зверев В.В., Попович Д.П., Бобровских Д.А. Экспериментальные исследования работы профилированных листов пролетом 6 м по однопролетной



- и двухпролетной схемам // Строительная механика и конструкции. 2024. № 2 (41). С. 98-105.
12. Кулешов В.В., Капырин Н.В., Поповин Д.П. Натурные испытания стального профилированного настила, работающего по двухпролетной схеме, с усиленной опорной зоной на средней опоре // Вестник науки. 2023. № 6 (63). С. 481-488.
13. Поповин Д.П., Семенов А.С., Тихомирова А.М. Современные направления исследования трехслойных сэндвич-панелей с легкими заполнителями // Эффективные конструкции, материалы и технологии в строительстве. Материалы международной научно-практической конференции. Липецк: ФГБОУ ВО «Липецкий государственный технический университет», 2019. С. 101-106.
14. Зверев В.В., Жидков К.Е., Салдаев А.Ю. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния элементов покрытия бескаркасного складчатого здания типа "Эксергия" // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. 2012. № 2(26). С. 9-15.
15. Подзоров А.В., Карманов И.В., Зверев В.В. и др. Формы потери устойчивости участков поперечного сечения стального стенового элемента бескаркасного здания // Строительная механика и расчет сооружений. 2016. № 4(267). С. 68-73.
16. ТУ-1120-004-316631300162970-2019 Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для сталежелезобетонных конструкций (настилы силовые - НС «Бизон»).
17. Патент № 2811556 С1 Российская Федерация, МПК E04B 5/36. Строительный элемент : № 2023120363 : заявл. 02.08.2023 : опубл. 15.01.2024 / С. М. Анпилов, В. В. Бондарь, С. Н. Леонович [и др.]. – EDN SLQXTV.
18. Анпилов, С. М. Инновационные технологии для быстровозводимых объектов массового строительства / С.М. Анпилов, Н. М. Зайченко, Л. Р. Маилян // Инженерная экономика : Материалы международной научно-технической конференции, Минск, 27–28 ноября 2024 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2024. – С. 610-629. – EDN WIKYFM.
19. Опыт практической реализации инновационных строительных материалов и изделий / С. М. Анпилов, В. Т. Ерофеев, В. И. Римшин [и др.] // Строительные материалы. – 2024. – № 8. – С. 31-39. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-827-8-31-39. – EDN DDPCEZ.
20. ГОСТ 14918-2020 Прокат листовой горячеоцинкованный. Технические условия : дата введения 30.07.2020. – Москва : Стандаринформ, 2020. – 32 с.
21. ГОСТ 11701-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение тонких листов и лент : дата введения 17.07.1984. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 15 с.
22. ГОСТ 8829-2018 Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости : дата введения 1.09.2019. – Москва : Стандаринформ, 2019. – 20 с.
23. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*: утвержден Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 3 декабря 2016 г. N 891/пр. Изменения N 6, утв. Приказом Минстроя России от 05.09.2024 N 597/пр.
24. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния стальных гнутых профилей с трапециевидными гофрами / В. В. Зверев, В. И. Римшин, С. М. Анпилов [и др.] // Строительная механика и конструкции. – 2025. – № 4(47). – С. 86-97. – DOI 10.36622/2219-1038.2025.47.4.008. – EDN RUDVWP.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 23.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 23.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья
УДК 691
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2026_2_97

РАЗРАБОТКА ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ ЖЕЛЕЗО-СЕРНИСТЫХ ОТХОДОВ

© Авторы, 2026
SPIN: 1941-0360

ИСАКУЛОВ Баизак Разакович
доктор технических наук, профессор
учреждение «Баишев университет»
(Казахстан, Актюбе, e-mail: baizak@mail.ru)

Scopus ID: 57224197094

ИЛЬЯСОВ Алланазар Тореханович
доктор технических наук, профессор
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
(Узбекистан, Нукус)

ORCID 0000-0003-2483-9727

ТУРГАЕВ Жамбыл Адилбаевич
PhD доктор философии, доцент
Каракалпакский государственный университет имени Бердаха
(Узбекистан, Нукус)

Scopus ID: 58567470500

ИСАКУЛОВ Абилхаир Байзакович
PhD доктор философии, доцент
Актюбинский региональный университет имени К. Жубанова
(Казахстан, Актюбе)

ORCID 0000-0001-7633-4064

ДЖУМАБАЕВА Камар Муратовна
докторант, старший преподаватель
Западно-Казахстанский агротехнический университет
имени Жангир хана
(Казахстан, Уральск)

Аннотация. В работе рассмотрены вопросы детоксикации и утилизации токсичных серных отходов нефтегазовой отрасли в составе строительных материалов. В ходе опытных работ установлено, что трехвалентные железистые отходы на основе пиритного огарка способны окислять сернистые отходы с последующим переходом в двухвалентное положение. При совместной механохимической активации железо-сернистых отходов с цементом и их последующего твердения, прочность железо-сернистых вяжущих веществ в 90 суточном возрасте повышалась до 73,9 МПа. Полученные результаты исследования подтверждают, что разработанные составы железо-сернистых вяжущих можно использовать в качестве растворов и бетонов в широком спектре строительной отрасли.

Ключевые слова: утилизация; механохимическая активация; детоксикация; нейтрализация; окисление и восстановление; железо-сернистые вяжущие; токсичные отходы

Благодарности: исследование выполнялось в рамках финансирования КН МННВО РК (ИРНАР25794879 «Утилизация отходов полиэтиленовой пленки в качестве связующего для получения тростниково-слоистого строительного материала»).

Для цитирования: Разработка эффективных строительных материалов на основе железо-сернистых отходов / Б.Р. Исакулов, А.Т. Ильясов, Ж.А. Тургаев, А.Б. Исакулов, К.М. Джумабаева // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 97-105. doi:10.51608/26867818_2026_2_97.



Original article

DEVELOPMENT OF EFFECTIVE CONSTRUCTION MATERIALS BASED ON IRON-SULFIDE WASTE

© The Author(s) 2026

ISAKULOV Baizak Razakovich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
Baishev University Aqtobe
(Kazakhstan, Aktobe)

ILYASOV Allanazar Torekhanovich

Doctor of Sciences (Technical), Professor
Karakalpak State University named after Berdakh
(Uzbekistan, Nukus)

TURGAYEV Zhambyl Adilbaevich

Ph.D., Associate Professor
Karakalpak State University named after Berdakh
(Uzbekistan, Nukus)

ISAKULOV Abilkhaer Baizakovich

Ph.D., Associate Professor
ARSU (Kazakhstan, Aktobe)

DZHUMABAEVA Kamar Muratovna

Ph.D. candidate, senior lecturer
WKATU after Zhangir Khan (Kazakhstan, Uralsk)

Abstract. This paper examines the detoxification and utilization of toxic sulfur-containing waste from the oil and gas industry in construction materials. Experimental studies have shown that trivalent iron-based waste derived from pyrite residue is capable of oxidizing sulfur-containing waste, subsequently converting it to a divalent state. Upon combined mechanochemical activation of iron-sulfur waste with cement and subsequent hardening, the strength of iron-sulfur binders at 90 days increased to 73.9 MPa. The results of this study confirm that the developed formulations of iron-sulfur binders can be used as mortars and concretes across a wide range of applications in the construction industry.

Keywords: waste treatment; mechanochemical activation; detoxification; neutralization; oxidation and reduction; iron-sulfur binders; toxic waste

Acknowledgments: The study was carried out within the framework of the financing of the Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (IRNAR25794879 "Recycling of waste polyethylene film as a binder for the production of reed-laminated building material").

For citation: Development of effective construction materials based on iron-sulfide waste / B.R. Isakulov, A.T. Ilyasov, Z.A. Turgayev, A.R. Isakulov, K.M. Dzhumabaeva // *Expert: theory and practice*. 2026. № 2 (33). Pp. 95-105. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_97.

Введение. В Республике Казахстан в последнее время всё больше накапливаются токсичные сернистые отходы от нефтепереработки. Данные отходы, обладая высокой экологической опасностью, загрязняют окружающую среду, оказывают негативное воздействие на здоровье населения и способствуют возникновению различных заболеваний.

С ростом экономики страны благосостояние населения повышается в положительную сторону и увеличивается спрос на жилищное строительство. В связи с этим приобретают актуальность темы по разработке теплоизоляционных, теплоизоляционно-

конструкционных материалов с использованием вторичных ресурсов, что является важным для народного хозяйства и экономики страны.

В соответствии с научными разработками ряда исследователей [1–4], введение тонкоизмельченных технических серных отходов положительно влияет на физико-технические характеристики вяжущих веществ и бетонов. Анализ работ авторов [5–9] подтверждает, что утилизация сернистых отходов в составе строительных материалов является наиболее перспективным направлением в строительной отрасли. В указанных исследованиях не полностью



раскрыты процессы воздействия измельченных серных добавок на структурообразование и технико-эксплуатационные характеристики серосодержащих цементных композитов. Также не определены оптимальные рецептурные составы, методы последовательности первичной подготовки содержаний компонентов и технологические условия подготовки и производства железо-сернистых легких бетонов. Установлено, что введение сернистых отходов в количестве 1,0–2,5 %, осуществляемое методом совместного сухого помола с исходными сырьевыми материалами, приводит к увеличению прочности на 50–65 % для ячеистых бетонов с плотностью [10–14] 600–750 кг/м³.

В других научных исследованиях [15–18] описывается, что добавка золы отхода сернокислого производства, содержащих в составе в пределах не более 60% технической серы, положительно влияет на гидратационные процессы алюминатных и кальциевых составляющих сланцевой золы и хорошо способствует структурообразованию серосодержащего цементного камня. К недостаткам указанных исследований можно отнести отсутствие данных о количественных показателях добавляемого шлама и добавки, а также условий твердения материала и оценки влияния введенных добавок на физико-механические характеристики полученных материалов.

В научных исследованиях [19–23] утверждается, что механохимическая активация вяжущих и растворов приводит к улучшению физико-механических свойств железо-сернистых строительных материалов. При механохимической активации и обеззараживании токсичных нефтегазовых отходов в водной среде для получения строительных материалов используется метод взаимной нейтрализации токсичных компонентов, присутствующих в сернистых отходах. Недостатками этих исследований является то, что при проведениях опытно-экспериментальных работ не была проведена предварительная оценка вероятности протекания химических процессов между железо-сернистыми отходами, что не полностью раскрывает полноту анализа происходящих процессов в составах вяжущих веществ.

В научных исследованиях [24–31] описывается, что сухое измельчение производится до определенного состояния и после этого дополнительный помол не приводит к положительному результату и уменьшению размера частиц используемых материалов, а наоборот – приводит к агрегации мелющих тел из-за электризации в процессе измельчения. В работах описывается, что при мокрых измельчениях отмечено увеличения дисперсной частицы и активности вяжущих материалов определенного минералогического и химического состава [27–35]. Недостатками этих работ является то, что не определены оптимальные методы помола добавок на основе

сернистых отходов совместно с железосодержащими компонентами.

В работах [30–39] показано, что процесс механохимической активации вяжущих на основе различными компонентами промышленных отходов повышает качественные характеристики получаемых бетонных композитов. К недостаткам этих работ относятся недостаточная изученность воздействия различных добавок на минералогические свойства и фазовый состав изучаемых материалов.

Анализ обзора проведенных исследований позволяет обратить внимание на необходимость изучения актуальной проблемы для нефтедобывающих регионов Казахстана по созданию эффективных строительных материалов на основе вторичных ресурсов, таких как, сернистые и железосодержащие промышленные отходы.

Целью данного исследования является изучение оптимального использования токсичных серных отходов в составе легких бетонов методом обеззараживания и механохимической активации при использовании их в производстве различных строительных материалов, бетонов и растворов.

Материалы и методы исследования. Для разработки железо-сернистых вяжущих веществ в качестве добавки использовались пиритные огарки с предприятия «Фосфохим» и сернистые отходы нефтедобывающей месторождений Актюбинской области Казахстана. Химический состав пиритных шлаков, масс. %, представлен следующим образом: CaO – 10,3 %; SiO₂ – 19,6 %; Fe₂O₃ – 66,3 %; Al₂O₃ – 2,4 %; MgO – 1,2 %; прочие примеси – 0,2 %. Марка используемого в составе железо-сернистого вяжущего – техническая сера по государственному стандарту № 9998 по ГОСТ 127.1–93 [38]. Содержание химических элементов в составе технической серы выглядит следующим образом: сера – 99,06%; зола – 0,4%; органические вещества – 0,05%; вода – 0,01. На рисунке 1 представлены внешний вид и форма частиц пиритного огарка и технической серы.

Для проведения экспериментальных исследований в качестве вяжущего материала использовался портландцемент марки 500 нормального твердения, произведенный на Шымкентском цементном заводе. Минералогический состав цемента по массе представлен следующим образом: алит C₃S – 62,9 %, белит C₂S – 16,1 %, трехкальциевый алюминат C₃A – 4,8 %, четырехкальциевый алюмоферрит C₄AF – 13,9 %. Химический состав портландцемента марки 500, масс. %, включает: SiO₂ – 22,1; CaO – 65,65; MgO – 1,28; Fe₂O₃ – 4,53; CaO – 0,16; Al₂O₃ – 4,67; SO₃ – 0,38; R₂O – 0,73. Для приготовления цементного вяжущего использовалась водопроводная питьевая вода, соответствующая требованиям стандарта «Вода для бетонов и растворов».



Рисунок 1 - Внешний вид и форма частиц пиритного огарка (А) и технической серы (Б)

Для разработки железо-сернистых вяжущих была выполнена термодинамическая оценка вероятности протекания химической реакции между токсичными компонентами промышленных отходов с использованием метода термодинамических расчетов с шламом пиритного огарка и измельченного шлама технической серы. При проведении опытных работ шлама пиритного огарка и измельченной технической серы подобрали в определенных пропорциях, отвечающих требованиям стехиометрических коэффициентов реакций, происходящих между промышленными отходами. Для проведения опытных работ весовые соотношения компонентов промышленных отходов на основе пиритного огарка и технической серы использовались в пропорциях 1 : 2,65; 1 : 2; 1 : 1,6. А в процентных соотношениях использовались – 6 % : 16%; 8 % : 16 %; 10 % : 16 %. Для обеззараживания и детоксикации токсичных веществ в промышленных отходах использован метод совместной механохимической обработки составляющих всех компонентов разрабатываемого вяжущего. Механохимическую активацию проводили по методике последовательного изучения трёхкомпонентной растворной смеси вяжущего состоящего из железо-сернистой добавки на основе технической серы и пиритного огарка совместно с цементным раствором на шаровой мельнице ЛШМ-750 посредством истирающих и ударных воздействий. После этого определяли причины повышения активности исходного вяжущего. Удельные поверхности компонентов железо-сернистых сухих смесей после помола в шаровой мельнице представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Удельные поверхности железо-сернистых вяжущих компонентов

Добавка серы, %	Пиритный огарок, м ² /кг	Цемент, м ² /кг	Серы м ² /кг
6	298	400	583
8	297	420	578
10	265	450	600

Минералогический и фазовый состав активированного механохимическим методом железо-сернистого-цементного вяжущего изучали с использованием рентгенофазового исследования. Рабочие съемки проводилось в диапазоне углами дифракции от 2 до 32°. Расшифровка рентгенограмм проводилась на основе эталонных образцов соответствующих минералов. Электронно-микроскопические съемки проводилась на сканирующем электронном микроскопе FILIPS. Для подготовки железо-сернистых-цементных образцов поверхность свежего скола материала препарировалась методом вакуумно-термического напыления на установке ВУП-5. Для исследования влияния добавок серы на физико-механические характеристики железо-сернистых вяжущих веществ нами были определены следующие соотношения компонентов железо-сернистой растворной смеси по массе %: цемент : пиритный огарок : сера – 78:16:6, 76:16:8 и 74:16:10. Водоцементное отношение железо-сернистых вяжущих подбиралось таким образом, чтобы обеспечить возможность заливки железо-сернистого раствора в формы и достижения оптимальной поровой структуры, обеспечивающей максимальную прочность. Для изучения влияния серы на прочностные свойства железо-сернистых вяжущих изготовлены образцы с размерами сторон 100×100×100 мм. Для сравнения результатов анализа также были изготовлены образцы из цементных растворов при водоцементном отношении 0,385. Техническая сера и отходы вводилась в пределах от 6% до 10% в комбинации с пиритным огарком: 16% пиритного огарка + 6% серы, 16% пиритного огарка + 8% серы и 16% пиритного огарка + 10% серы от массы сухих компонентов. Характеристики вяжущего определялись в соответствии с ГОСТ 30515–97, ГОСТ 31108–2003 и ГОСТ 7473–2010. Предел прочности при сжатии и при изгибе измерялся на образцах согласно ГОСТ 31108–2003и ГОСТ 7473–2010 [34–39].

Результаты и обсуждения

1. Результаты анализа термодинамического расчета по прохождению реакции по соединению технической серы (IV) с пиритным огарком (III) с применением электрохимического потенциала (ЭДС) соответствующих пар представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Оценка реакционной способности с помощью электродвижущей силы (э.д.с.) электрохимических пар

Системы и реакции	Электродвижущие силы электрохимических пар
Fe (III) +S ⁰ →Fe(II) +S (VI)	E = 0,771 – (- 0,13) = + 0,784 (в) > 0



Полученные результаты в табл. 2 показывают, что полученные значения электродвижущей силы (ЭДС) электрохимических систем по стандартным потенциалам электродов протекают возможно, так как величина ЭДС положительна ($E.M.F. > 0$). Также полученные результаты показывает, что трехвалентное железо на основе пиритного огарка способно окислять двухвалентную техническую серу, переходя затем в двухвалентное железистое состояние. Также следует заметить, что железосернистые шламы $pH > 3$ (щелочная реакция водной вытяжки), подвергались термической обработке, аналогичной цементному клинкеру, и обладают вяжущими способностями. Значения стандартных энтальпий ΔH^0 и энтропий ΔS^0 при температуре 298 К, взятые из анализа литературных источников [36–39], приведены в таблице 3. Расчеты изменений термодинамических величин в химических реакциях выполнялись по известной формуле:

$$\Delta H^0_{298\text{хр}} = \Delta H^0_{298}(\text{конечных}) - \sum \Delta H^0_{298}(\text{переходный})(1)$$

Таблица 3 – Стандартные значения энтальпий и энтропий веществ, принимающих участие в реакциях

Вещество	ΔH^0_{298} ккал/моль	ΔS^0_{298} ккал/град·моль
SO ₂	-71,0	59,2
Fe ₃ O ₄	-266,5	35,0
FeS	-22,8	16,1
Fe ₂ O ₃	-145,2	21,5
FeS ₂	-38,8	12,7
FeO	-64,5	13,4

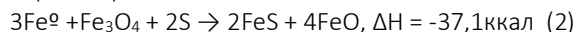
При механохимическом истирании и перемешивании технической серы с железистым пиритным огарком в влажностно-щелочной среде были рассчитаны энтальпии реакций окисления-восстановления. Расчёты выполнялись на основе изменений стандартных термодинамических потенциалов при нормальной температуре $T = 298$ К. Полученные значения ΔH – энтальпий или тепловых эффектов этих реакций – приведены в таблице 4, при этом буквенные обозначения реакций сохранены в алфавитном порядке.

Таблица 4 Тепловые эффекты реакций окисления-восстановления

Буквенные обозначения реакций	Системы и реакции	Тепловой эффект реакции, ΔH^0 ккал
A	$3\text{Fe}_3\text{O}_4 + \text{S} \rightarrow \text{FeS} + 4\text{Fe}_2\text{O}_3$	195,9
B	$\text{FeS} + \text{S} \rightarrow \text{FeS}_2$	-16,0
C	$4\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{S}^0 \rightarrow \text{SO}_2 + 4\text{FeO}$	-38,6
D	$2\text{FeO} + 3\text{S}^0 \rightarrow 2\text{FeS} + \text{SO}_2$	12,4
E	$\text{FeO} + \text{S} \rightarrow \text{FeOS}$	20,8

Сравнивая вычисленных значений энтальпий и их полученных знаков при расчете можно заключить, что полученные реакции A (195,9), D (12,4) и E (20,8) термодинамически невозможны, поскольку их

ΔH положительны (> 0), тогда как остальные реакции способны протекать энергично при обычной температуре. Из расчета видно, что наибольшую вероятность протекания реакции имеют B (-16,0) и C (-38,6), так как они имеют наибольшие отрицательные значения ΔH . По нашему мнению целесообразно проводить реакции в присутствии достаточного количества воды, в таком случае ионы водорода в реакции B (-16,0) связываются в нейтральные молекулы воды в щелочной среде, а диоксид серы превращается в соединения типа CaSO₃. При механохимическом обработке, вероятно существенную роль играет температурный фактор – мгновенный локальный нагрев реагентов в момент механического удара. Значительную роль в твердофазных реакциях играют дефекты примесного и нестехиометрического происхождения в кристаллических решетках оксида железа. Следует также отметить, что термодинамически невозможная реакция по схеме C при наличии металлического железа (Fe⁰) становится осуществимой ($\Delta H < 0$).



Полученные результаты термодинамических расчетов и химических реакций свидетельствуют о том, что техническая сера взаимодействует с оксидами железа при механическом воздействии, происходящем при температурах, близких к комнатной.

2. По результатам исследований установлено, что совместное механохимическая активация и измельчение железо-сернистых компонентов на основе технической серы и пиритного огарка с портландцементом оказывает положительное влияние на прочностные свойства разрабатываемых вяжущих веществ. Установлено, что прочность железо-сернистых образцов в 90 суточном возрасте достигает 73,9 МПа. Повышение прочности активированных железо-сернистых вяжущих, вероятно, можно объяснить тем, что пиритный огарок выполняет роль инициатора физико-химического процесса коагуляции железо-сернистой вяжущей смеси, при котором дисперсные частицы поляризуются и притягиваются друг к другу, что способствует формированию прочной структуры материала. При этом, особое внимание надо уделить к вычисленным реакциям D (12,4) и E (20,8), поскольку эти реакции показывает принципиальную возможности рациональной утилизации токсичных железо-сернистых отходов в составе строительных материалов и их высокую эколого-экономическую эффективности в масштабе страны.

3. По результатам исследования установлено, что уменьшение прочностных свойств железо-сернистых вяжущих веществ связано с уменьшением концентрации связующих фаз в поровой структуре железо-сернистого цементного камня. Наибольшие повышения прочностных свойств отмечаются при введениях в состав вяжущего вещества сернистых



добавок при объеме от 6% до 10% от массы сухих компонентов. Так как прочностные свойства железосернистого вяжущего камня во многом определяются его минералогическим и фазовым составом, рационально рассмотреть влияние сернистых добавок на эти показатели. Полученные результаты съемки рентгенофазового анализа приведены в рисунке 4 (А), (Б) и (В).

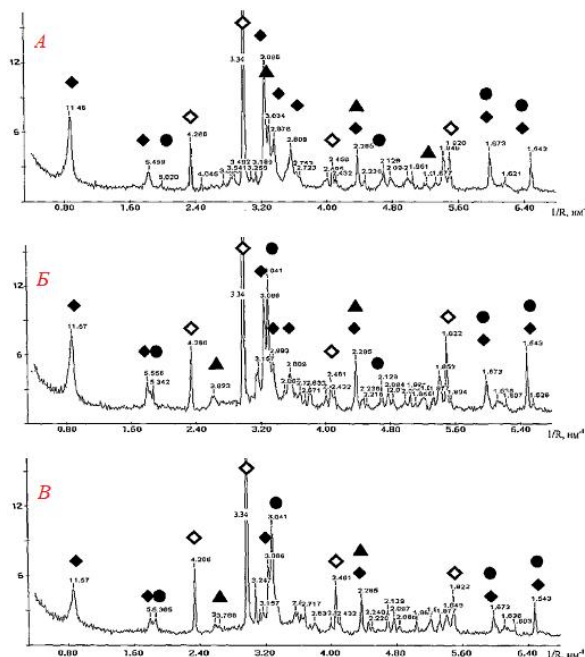


Рис. 4. Рентгенофазовые анализы образцов железосернистого вяжущего камня с добавками серы в количестве 6%(А), 8%(Б) и 10%(В): ◆ - 1,1-нм тоберморит; ● - гидросиликаты; ◇ - кварц; ▲ - кальцит

По полученным результатам рентгенофазового анализа в образцах железосернистого вяжущего раствора с добавками сернистых отходов в качестве основных формирующих минералов являются, в основном, минералы тоберморитовой группы: 1,1-нм тоберморит и низкоосновные гидросиликаты (рис. 4 (А), (Б) и (В)). В структурных составах этих основных вяжущих минералов также присутствует значительное количество аморфных фаз, состоящих из гелеобразных гидросиликатов, что соответствует данным исследований [34–39].

В железосернистых образцах с добавками серы в количестве 6% обнаружено, что в их составе относительное содержание тоберморита на 45% выше, чем по сравнению с другими исходными образцами, что доказывает формирование в структурном составе железосернистого вяжущего камня большего объема связывающего минерала (рис. 4А). Увеличение в составе железосернистого вяжущего камня повышенного связывающего тоберморитового минерала подтверждается также увеличением интенсивности дифракционных максимумов. Повышение ширины этих пиков и снижение рассчитанных

размеров областей когерентного рассеяния тоберморита на 33 %, по сравнению с исходными образцами, указывает на уменьшение степени кристалличности минерала. Результаты позволяют заключить, что за счет увеличения количества мелкозернистых кристаллов тоберморита в структуре возрастает доля аморфной фазы на 3,8 %. В образцах с 8 % добавкой серы (рис. 4Б) относительное содержание тоберморита увеличилось на 31 %, при этом размер областей когерентного рассеяния снизился на 42 %, а доля аморфной фазы возросла на 8,8 %. В образцах с 10 % серы (рис. 4В) содержание тоберморита оказалось выше на 12 %, тогда как размер областей когерентного рассеяния уменьшился на 49 %, а содержание аморфной фазы увеличилось на 16 %. В железосернистых образцах с добавкой серы в диапазоне 6–10 % наблюдается значительное увеличение интенсивности дифракционного максимума при $d = 0,3041$, что соответствует данным исследований [34–39] и указывает на присутствие относительно хорошо кристаллизованных гидросиликатов. Это позволяет предположить, что степень кристаллизации цементного камня повышается с увеличением содержания технической серы. Рост относительного содержания 1,1-нм тоберморита в структуре цементного камня при добавлении серы, согласно известным представлениям и результатам работ [34–39], объясняется формированием большего числа «аномальных» разновидностей минерала, для которых требуется значительно меньше энергии по сравнению с обычными соединениями. В результате эти кристаллы по степени кристаллизации близки к гидросиликатам кальция. На рисунках 5(А), 5(Б) и 5(В) представлены электронные микрофотографии микроструктуры плотных образцов железосеросодержащего цементного камня с добавкой технической серы от 6 до 10 %.

Полученные результаты наших исследований хорошо согласуются с результатами [34–39] и они подтверждают, что повышение прочности силикатных материалов достигается за счет формирований в структуре железосернистого вяжущего камня с преобладанием низкоосновных гидросиликатов кальция. Из анализа можно утверждать, что при введении в состав железосернистого вяжущего камня 6–10% серных добавок повышается их уплотняющие и укрепляющие воздействия на всю структуру.



Рис. 5. Микроструктура образцов железо-сернистого вяжущего камня с добавками серы 6 % (А), 8% (Б) и 10% (В) по массе

4. По итогам исследования разработанные оптимальные составы железо-сернистых вяжущих приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Разработанные составы железо-сернистых вяжущих

Технич. сера, %	Пиритный огарок, %	Цемент, %	Вода, %	Плотность, кг/м ³
6	16	78	30	1583
8	16	76	30	1585
10	16	74	30	1589

Также в ходе экспериментальных исследований определены физико-механические свойства железо-сернистых вяжущих с добавками серы, и они приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Характеристики железо-сернистых с добавками серы

№ п/п	Состав вяжущего, %				Плотность	Предел прочности, МПа
	Сера отходы,	Пиритный		Влаж-		

	%	огарок, %	Цемент, %	нось, %	в сухом состоянии, кг/м ³	при сжатии	при изгибе
1	6	16	78	9,79	1590	72,7	10,53
2	8	16	76	9,85	1570	73,9	10,74
3	10	16	74	9,91	1590	73,5	10,65

Нашими экспериментами подтвержден факт, что с увеличением срока твердения до 90 суток во всех трех сериях образцов железо-сернистых вяжущих с добавками серы в пределах 8–10 % возрастают прочностные характеристики и достигают соответственно 72,7; 73,9 и 73,5 МПа во всех исследуемых материалах (рис. 6). Также можно отметить, что присутствие серы во всех составных компонентах железо-сернистых вяжущих наблюдается способности к повышению механических свойств железо-сернистых образцов. Полученные результаты приведены в рис. 6.

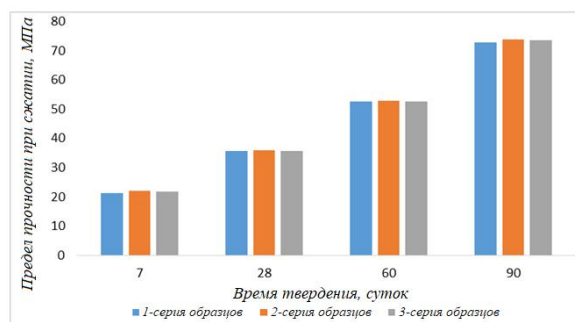


Рис. 6. Изменение предела прочности при сжатии железо-сернистых вяжущих в зависимости от срока твердения

Нами установлено, что добавки на основе серных отходов в количестве от 6 до 10% в состав вяжущих способствуют повышению прочности железо-сернистых вяжущих образцов при сжатии, изготовленных на растворах с водоцементным отношением 0,385, как во влажном, так и в сухом состоянии. Дальнейшее увеличение количества серных отходов более 12% не дает положительного эффекта, так как прочностные свойства железо-сернистого вяжущего начинают снижаться. Полученные нами результатами подтвержден факт, что увеличением количества серных добавок в пределах 6-10%, плотность железо-сернистых вяжущих увеличивается на 9-10%, а предел прочности повышается примерно на 17%. Полученные результаты также позволяют рекомендовать производство железо-сернистых вяжущих широкого спектра для различных строительных материалов, растворов и бетонов. При этом необходимо отметить, что для полного понимания процессов структурообразования железо-сернистого вяжущего требуются дальнейшие исследования и уточнения.

Научная новизна данной статьи заключается в том, что предложенный метод механохимической активации и детоксикации промышленных отходов



позволяет снизить расход дорогостоящего цемента за счет частичной его замены доступными промышленными отходами – такими как, сернистые отходы и железистые пиритные огарки. Использование токсичных сернистых отходов в составе строительных материалов и бетонов решает одновременно несколько задач, как экономических, так и экологических.

Практическая значимость исследования состоит в том, что полученные результаты могут быть рекомендованы для строительной отрасли при производстве различных видов строительных материалов и изделий.

Выводы

1. С помощью термодинамических расчетов была определена вероятность протекания химических реакций между пиритным огарком и технической серой с использованием стандартных термодинамических величин и электрохимических потенциалов.

2. Механохимическая активация и совместное измельчение железо-сернистых компонентов с цементом оказывает положительное влияние на механические свойства исследуемых образцов.

3. По данным рентгенофазовых и электронно-микроскопических анализов установлено, что в образцах железо-сернистого цементного раствора с добавками серы – основными минералами являются представители тоберморитовой группы – тоберморит и низкоосновные гидросиликаты.

4. Добавка технической серы в количестве 6–10% в состав железо-сернистой вяжущей смеси положительно сказывается на их прочностных характеристиках, повышая прочностные характеристики при сжатии до 73,9 МПа.

На основании проведенных экспериментальных исследований можно сделать вывод, что механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов благоприятно и доступно обеспечивает получение железо-сернистых вяжущих с высокими физико-техническими свойствами.

Библиографический список

1. Хайров Г. Б. Современные экологические проблемы в нефтяной отрасли Республики Казахстан // Нефть и газ. - 2001. - № 3. - С. 93–98.
2. Сангалов Ю. А., Дмитриев Ю. К., Маталинов В. И. и др. Элементная сера: от сырья к новым веществам и материалам // Вестник Башкирского университета. - 2004. - № 2. - С. 31–34.
3. Порфирьева Р. Т. Разработка научных основ малоотходных технологий переработки серы и ее соединений в сульфиды и полисульфиды. дис. докт. техн. наук, 2006. - 259 с.
4. Медведева Г. А. Технология полисульфидных веществ на основе серы, пирита, глицерофосфата кальция и материалов с использованием золошлаковых отходов

ТЭЦ. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук. - Казань, 2006.

5. Характеристика серы. Применение серы. Медицинская сера. URL6 <https://fb.ru/article/157349/harakteristika-seryi-primenenie-seryi-meditsinskaya-sera>

6. Kutney G. Sulfur. History, Technology, Applications & Industry, 2007. - 260 p.

7. Массалимов И. А., Удовенко И. Ф., Киреева М. С. и др. Применение водных серосодержащих композиций в качестве средств защиты растений // Баш. хим. журнал. - 2006. - Т. 13. - № 4. - С. 97–100.

8. Малкин В. П., Мещеряков С. В. Оценка качественного и количественного состава «вещества», полученного при утилизации сернокислотных промотходов // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. - 2003. - № 6. - С. 5–11.

9. Бобович Б. Б., Девяткин В. В. Переработка отходов производства и потребления // Справочное издание / Под ред. докт. техн. наук, проф. Б. Б. Бобовича. - М.: «Интермет Инжиниринг», 2000. - 496 с.

10. Акбасова А. Д., Саинова Г. А., Колушпаева А. Т. Ростостимулирующие и бактерицидные препараты: Монография. - Германия: LAP Lambert Academic Publishing. - 2012. - 176 p.

11. Спиридонов Ф. М., Зломанов В. П. Тиосульфатная кислота и тиосульфаты // Химия халькогенов: Учебное пособие. - М.: МГУ, 2000. - 396 с.

12. Азиханова Д. К., Акбасова А. Д., Аймбетова И. О. Композиционные строительные материалы из техногенных отходов южного региона Казахстана // Znanstvenamisel journal № 12 / 2017. - С. 87–90.

13. Минигазимов Н. С. Нефтьшламы - резерв углеводородного сырья в РБ // Ресурсы — и энергосбережения в РБ: проблемы и решения: Тр. I науч. - техн. респуб. конф., Ч 2, Уфа, 17 октября 1997. - Уфа, 1997. - С. 6–10.

14. Абн-Ганнам Файсал, М. Бетон на активированном цементном вяжущем для автодорожного строительства: автореф. дис. ... канд. техн. наук / М. Абн-Ганнам Файсал. Ташкент, 1995. 21 с.

15. Агаджанов, В.И. Экономическая эффективность применения серы для модификации бетонов / В.И. Агаджанов, Т.В. Михайлова, Ю.И. Орловский // Бетон и железобетон. 1984. № 10. С 20–21.

16. Бутт, Ю.М. Портландцемент (Минералогический и гранулометрические составы, процессы модифицирования и гидратации) / Ю.М. Бутт, В.В. Тимашев. М.: Стройиздат, 1974. 328 с.

17. Базарбаева, С.М. Комплексная переработка и утилизация промышленных отходов Западного Казахстана (на примере основных производств Актюбинской и Атырауской областей): автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / С.М. Базарбаева. Шымкент: РК ЮКУГУ, 2010. 37 с.

18. Волженский, А.В. Смешанные портландцементы повторного помола и бетоны на их основе / А.В. Волженский, Л.Н. Попов. М., 1961. 220 с.

19. Особенности фазовой и структурной неравновесности металлургических шлаков / Ю.И. Гончаров, А.С. Иванов, М.Ю. Гончарова [и др.] // Изв. вузов. Сер. Строительство. 2002. № 4. С. 50–53.

20. Отходы химической промышленности в производстве строительных материалов / Л.И. Дворкин, В.Л. Шестаков, И.А. Пащков [и др.]. Киев: Будевильник, 1986. 128 с.



21. Калашников, В.И. Кинетика процессов структурообразования шлаковых вяжущих / В.И. Калашников, В.Ю. Нестеров // Актуальные проблемы современного строительства: сб. ст. докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 1994. С. 43–50.
22. Молчанов, В.И. Активация минералов при измельчении / В.И. Молчанов, О.Г. Селезнева, Е.Н. Жирнов. М.: Недра, 1988. 208 с.
23. Мень, А.Н. Физико-химические свойства нестехиометрических оксидов / А.Н. Мень, Ю.П. Воробьев, Г.И. Чуфаров. М.: Химия, 1973. 224 с.
24. Онина, М.М. Новый способ активации вяжущего / М.М. Онина // Бетон и железобетон. 1993. № 4. С. 12–14.
25. Орловский, Ю.И. Бетон и изделия на основе серосодержащих отходов / Ю.И. Орловский, А.С. Семченков, В.И. Хоржевский // Бетон и железобетон. 1995. № 3. С. 21–24.
26. Орловский, Ю.И. Полимерсерные бетоны / Ю.И. Орловский // Применение серы и серосодержащих отходов в строительной индустрии. 1990. С. 3–5.
27. Патуроев, В.В. Свойства и перспективы применения серного бетона / В.В. Патуроев, А.Н. Волгушев, Ю.И. Орловский // Бетон и железобетон. 1985. № 5. С. 16–17.
28. Джаши, Н.А. Серосодержащие композиты на основе высокопрочных цементных и гипсовых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук / Н.А. Джаши. СПб.: СПбГУПС, 1996. 23 с.
29. Пузанов, В.П. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз / В.П. Пузанов, В.А. Кобелев - Екатеринбург: УрО РАН, 2001. 634 с.
30. Физико-химические процессы структурообразования в строительных материалах из минеральных отходов промышленности / С.Т. Сулейменов - М.: Науч.-исслед. и изд. фирма "Манускрипт", 1996. 298 с.
31. ГОСТ 10181-2000. Бетонные смеси. Методы испытаний Текст. Взамен ГОСТ 10181.0-81 - ГОСТ 10181.4-81; введ. 01.07.2001.- М.: Изд-во стандартов, 2001. - 19 с.
32. ГОСТ 25820-2000. Бетоны легкие. Технические условия Текст. - Введ. 07.01.2001.-М.: Изд-во стандартов, 2000.-21 с.
33. Урьев, И.Б. Физико-химические основы технологии дисперсных систем и материалов / И.Б. Урьев. М.: Химия, 1988. 256 с.
34. Федосов, С.В. Нейтрализация токсичных отходов для получения вяжущих при производстве строительных материалов / М.В. Акулова, Б.Р. Исакулов, Б.А. Имангазин // Информационная среда вуза: материалы XX междунар. науч.-техн. конф. Иваново: ИГАСУ, 2013. С. 233–235.
35. Акулова, М.В. Механохимическая активация и детоксикация промышленных отходов для получения вяжущих легких бетонов // Вестник ВолГАСУ. Сер. Строительство и архитектура. 2013. Вып. 31 (50). Ч. 2. Строительные науки. С. 75–80.
36. Аминова А. С., Гайбуллаев С. А., Джураев К. А. Использование нефтешламов — рациональный способ их утилизации // Молодой ученый. - 2015. - № 2. С. 124–125.
37. Джураев К.А., Аминова А. С., Гайбуллаев С. А. Основные методы обезвреживания и утилизации нефтеотходов // Молодой ученый. № 10 (69). 2014. - С. 136–137.
38. Исакулов Б.Р. Получение высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих: дисс. ... доктора технических наук: 05.23.05.- Иваново, 2016.
39. Исакулов, Б. Р. Получение высокопрочных арболитобетонов на основе композиционных шлакощелочных и серосодержащих вяжущих: автореферат дис. ... доктора технических наук : 05.23.05. Иваново, 2015. 34 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 21.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 21.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья
УДК 621.791.052
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения
doi:10.51608/26867818_2026_2_106

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ОЦЕНКА СВАРИВАЕМОСТИ СТАЛИ 10ХСНД-2 В СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЯХ СТРОИТЕЛЬНЫХ МОСТОВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© Авторы, 2026
SPIN: 5846-8217

МЕРКУЛОВ Сергей Иванович
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Промышленного и гражданского строительства
Курский государственный университет; РААСН
(Россия, Курск, e-mail: pgs@kursksu.ru)

SPIN: 1332-6200

ЛЕВЕНЕЦ Роман Юрьевич
студент
БГТУ им. В.Г. Шухова (Россия, Белгород)

ПРИКАЗЧИКОВА Марина Максимовна
студент
БГТУ им. В.Г. Шухова (Россия, Белгород)

SPIN: 9629-5322

ЕСИПОВ Станислав Максимович
кандидат технических наук, доцент
*Белгородский государственный технологический университет
имени Владимира Григорьевича Шухова*
(Россия, Белгород, e-mail: bgtu@esipov-sm.ru)

Аннотация. В статье представлены результаты экспериментальной оценки свариваемости стали 10ХСНД-2, произведенной по технологии контролируемой прокатки с ускоренным охлаждением согласно ГОСТ 6713-2021. Выполнен сравнительный анализ ударной вязкости сварных соединений, выполненных автоматической сваркой под флюсом и в среде защитных газов, для металла в состояниях поставки и после нормализации. Показано значительное падение ударной вязкости КСУ⁻⁶⁰ в зоне термического влияния образцов, связанное с деградацией исходной метастабильной структуры под воздействием сварочного нагрева. На основе металлографического анализа и сопоставления с литературными данными определены критические температурные интервалы и обоснована необходимость строгого контроля погонной энергии для обеспечения эксплуатационной надежности сварных соединений строительных мостовых конструкций.

Ключевые слова: сталь; контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением; свариваемость; зона термического влияния; ударная вязкость; погонная энергия; стыковые швы

Для цитирования: Экспериментальная оценка свариваемости стали 10ХСНД-2 в стыковых соединениях строительных мостовых конструкций / С.И. Меркулов, Р.Ю. Левенец, М.М. Приказчикова, С.М. Есипов // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 106-112. doi:10.51608/26867818_2026_2_106.

Original article

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF THE WELDABILITY OF 10XCND-2 STEEL IN BUTT JOINTS OF BRIDGE STRUCTURES

© The Author(s) 2026

MERKULOV Sergey Ivanovich
Corresponding Member of the RAACS, Dr. of Technical, Prof., Head of the Department
Kursk State University; RAACS
(Russia, Kursk)



LEVENETS Roman Yurievich

student

BSTU named after V.G. Shukhov (Russia, Belgorod)

PRIKAZCHIKOVA Marina Maksimovna

student

BSTU named after V.G. Shukhov (Russia, Belgorod)

ESIPOV Stanislav Maksimovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

BSTU named after V.G. Shukhov

(Russia, Belgorod)

Abstract. The article presents the results of an experimental assessment of the weldability of steel produced using controlled rolling technology with accelerated cooling according to GOST 6713-2021. A comparative analysis of the impact strength of welded joints made by automatic submerged welding and in the environment of protective gases for metal in the states of supply and after normalization has been performed. A catastrophic drop in the impact strength of KCU⁻⁶⁰ in the zone of thermal influence of the samples is shown, associated with the degradation of the initial metastable structure under the influence of welding heating. On the basis of metallographic analysis and comparison with literature data, critical temperature ranges have been determined and the need for strict control of linear energy to ensure the operational reliability of welded joints of building bridge structures has been substantiated.

Keywords: steel; controlled rolling with accelerated cooling; weldability; zone of thermal influence; impact strength; linear energy; butt seams

For citation: Experimental assessment of the weldability of 10XCND-2 steel in butt joints of bridge structures / S.I. Merkulov, R.Yu. Levenets, M.M. Prikazchikova, S.M. Esipov // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 106-112. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_106.

Введение. Введение в действие межгосударственного стандарта ГОСТ 6713-2021 [1] стало знаковым событием для российской мостостроительной отрасли. Пришедший на смену действовавшему более 30 лет ГОСТу 6713-1991 [2], новый стандарт легализовал применение проката, изготовленного по современным термомеханическим технологиям - контролируемой прокатке (КП) и контролируемой прокатке с ускоренным охлаждением (КП+УО). Формально это расширяет технологические возможности металлургов, позволяет снизить себестоимость продукции за счет исключения дорогостоящей термической обработки и получить высокие механические свойства в состоянии поставки. Однако, как показала практика первых лет применения, технология КП+УО несет в себе и скрытые риски, связанные с изменением поведения металла при последующих технологических переделах, ключевым из которых является сварка.

В предыдущей работе [22] были освещены проблемы применения стали 10XCND-2, выполненной по технологии контролируемая прокатка и ускоренное охлаждение. Было отмечено, что прокат в состоянии КП+УО, обладая мелкозернистой структурой и повышенной прочностью, демонстрирует крайне неудовлетворительную свариваемость при использовании традиционных, десятилетиями отработанных технологий. В работах Сергеева А.А. и Звирия В.И. [3-4] убедительно показано, что после сварочного нагрева ударная вязкость в зоне термического влияния (ЗТВ) может падать в десятки раз, достигая значений ниже

нормативных требований. Это породило обоснованные опасения специалистов о возможности массовых разрушений строительных конструкций.

Технология КП+УО включает деформацию в строго контролируемых температурных интервалах и последующее ускоренное охлаждение водой со скоростью до 10–300 °C/c [7]. Это приводит к формированию специфической структуры [5; 8]:- сверхмелкое зерно феррита (3–8 мкм);- высокая плотность дислокаций;- выраженная кристаллографическая текстура и, как следствие, анизотропия свойств;- высокий уровень остаточных микронапряжений (до 30–50 % от предела текучести);- метастабильность, термодинамическая неравновесность.

Исследования Ботвиной Л.Р. и соавторов [5] показали, что для стали после КП+УО характерно повышение критической температуры хрупкости, наиболее выраженное для поперечно ориентированных образцов, и появление значительной анизотропии ударной вязкости с многочисленными расщелениями вдоль текстуры прокатки.

Такая структура обеспечивает высокие прочностные показатели в исходном состоянии, но крайне чувствительна к повторным нагревам. При сварке в зоне термического влияния (ЗТВ) происходят необратимые процессы: рекристаллизация, рост зерна аустенита, распад твердого раствора, коагуляция карбидов. Особенно опасен интервал температур 850–930 °C, где формируется структурно неоднородная смесь с пониженной ударной вязкостью [4].



Параллельное действие ГОСТ 6713-2021 и ГОСТ Р 55374-2012 [9], отсутствие чётких рекомендаций по сварке в обновлённых отраслевых документах [10-11] создают нормативную неопределённость и перекалывают риски на проектировщиков и производителей металлоконструкций. В интервью Д.С. Харламова [6] подчёркнуто, что новый ГОСТ не содержит классификации по видам термообработки, что лишает проектировщика однозначного критерия для выбора стали и назначения технологии.

В мостостроении для стыковых соединений наибольшее распространение получили два способа сварки:

- Автоматическая сварка под флюсом (АФ) по ГОСТ 8713-79 [12];

- Дуговая сварка в среде защитных газов (MAG) по ГОСТ 14771-76 [13].

Для сравнительного анализа провели испытания на ударную вязкость по ГОСТ 6996-66 стали 10ХСНД-2 по технологии КП+УО и по технологии Н: сваренной автоматической сварки под флюсом и сваренной в среде защитных газов.

Методология. Для достижения поставленной цели были проведены две серии экспериментов, моделирующих реальные заводские технологии сварки. Объектом исследования служила сталь 10ХСНД-2 толщиной 12 мм в двух состояниях поставки:

- Нормализация (Н) с мелкозернистой структурой феррита и перлита с размером зерна 15–25 мкм. Эта группа служила эталоном сравнения;

- Контролируемая прокатка с ускоренным охлаждением (КП+УО) - по ГОСТ 6713-2021, с исходной структурой сверхмелкого зерна (3–8 мкм).

Автоматическая сварка под флюсом (АФ). Сварка образцов (стыковое соединение С29-А по ГОСТ 8713-79 (рис. 1) выполнялась на режимах, типичных для мостостроения: флюс UF-02, проволока Св-08ГА диаметром 5 мм. Из сваренных пластин вырезали образцы типа VI по ГОСТ 6996-66 [23] (с U-образным концентратором).

Для детального исследования градиента свойств в ЗТВ надрезы располагали по оси шва, по

линии сплавления и на расстоянии 1, 2, 3, 4 мм от линии сплавления. Испытания на ударный изгиб проводили при температуре –60 °С на маятниковом копре МК-300.



Рис. 2. Схема вырезки образцов и расположения надрезов

Для каждой позиции испытывали по 6 образцов, результаты усредняли. Результаты испытаний представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1 – Ударная вязкость стали 10ХСНД-2, состояние Н (сварка АФ)

Ударная вязкость КСЧ-60 (Дж/см ²)							
тип образца	по оси шва	место надреза					
		по линии сплавления	на расстоянии 1 мм от линии сплавления	на расстоянии 2 мм от линии сплавления	на расстоянии 3 мм от линии сплавления	на расстоянии 4 мм от линии сплавления	
VI	92	155	203	210	221	245	
VI	88	183	154	185	199	231	
VI	102	146	152	159	184	250	
VI	78	177	187	201	211	241	
VI	65	199	205	198	214	256	
VI	107	141	190	210	200	231	

Из полученных данных видно, что металл, изготовленный по технологии нормализации, во всех исследуемых зонах уверенно превышает минимально допустимый порог ударной вязкости в

Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		Способ сварки	$s = s_1$	b		e , не более	g	
	подготовленных кромок свариваемых деталей	сварного шва			Номин.	Пред. откл.		Номин.	Пред. откл.
С29			АФФ	Св. 22 до 26	5	+1 –2	40	3,0	+2,0 –2,5
				Св. 26 до 30	6	+2 –1	42		+2,0 –3,0
			АФФ*	От 6 до 9	3	± 1	22	2,5	± 1,5
				Св. 9 до 16	4		26		
				Св. 16 до 24	5		34		
Св. 24 до 32	6	±1,5	40	3	±2				

* Перед сваркой первого шва зазор на 1/3 толщины основного металла необходимо заполнить флюсом, а затем на оставшиеся 2/3 – крупкой из электродной проволоки, окатышами или другим гранулированным металлом.

Рис. 1. Схема стыковки образцов С29-А по ГОСТ 8713-79



Таблица 2 – Ударная вязкость стали 10ХСНД-2, состояние КП+УО (сварка АФ)

Ударная вязкость КСУ-60 (Дж/см ²)						
место надреза						
тип образца	по оси шва	по линии сплавления	на расстоянии 1 мм от линии сплавления	на расстоянии 2 мм от линии сплавления	на расстоянии 3 мм от линии сплавления	на расстоянии 4 мм от линии сплавления
VI	37	17	23	9	15	82
VI	24	21	28	11	22	50
VI	40	20	17	24	19	45
VI	36	17	26	24	29	48
VI	31	11	31	25	17	89
VI	42	12	10	11	9	54

Таблица 3 – Ударная вязкость стали 10ХСНД-2, состояние Н (сварка МАГ)

Ударная вязкость КСУ-60 (Дж/см ²)						
место надреза						
тип образца	по оси шва	по линии сплавления	на расстоянии 1 мм от линии сплавления	на расстоянии 2 мм от линии сплавления	на расстоянии 3 мм от линии сплавления	на расстоянии 4 мм от линии сплавления
VI	111	80	240	107	108	152
VI	109	163	180	118	239	198
VI	111	244	199	206	210	251
VI	83	170	205	138	238	241
VI	86	138	140	221	149	202
VI	78	84	184	156	268	198

29 Дж/см². Металл, изготовленный по технологии КП+УО, напротив, показал неудовлетворительные результаты. Значения КСУ⁻⁶⁰ в ЗТВ (зонах 1-3 мм) находятся в диапазоне 9-31 Дж/см², что значительно ниже требуемого уровня. Особенно критично падение вязкости непосредственно на линии сплавления (среднее 16,3 Дж/см²).

Сварка в среде защитных газов (МАГ). Сварка образцов (стыковое соединение С15-ИП по ГОСТ 14771-76) выполнялась в смеси газов Ar (80%) + CO₂ (20%) проволокой Св-08Г2С диаметром 1,2 мм. Подготовка образцов, нанесение надрезов и испытания проводились по той же методике, что и для сварки под флюсом. Результаты испытаний представлены в таблицах 3 и 4.

Таблица 4 – Ударная вязкость стали 10ХСНД-2, состояние КП+УО (сварка МАГ)

Ударная вязкость КСУ-60 (Дж/см ²)						
место надреза						
тип образца	по оси шва	по линии сплавления	на расстоянии 1 мм от линии сплавления	на расстоянии 2 мм от линии сплавления	на расстоянии 3 мм от линии сплавления	на расстоянии 4 мм от линии сплавления
VI	52	48	28	29	28	44
VI	50	37	34	28	27	30
VI	56	60	22	35	29	29
VI	44	41	35	25	30	35
VI	30	35	19	29	29	40
VI	64	29	29	31	31	41

Условное обозначение сварного соединения	Конструктивные элементы		Способ сварки	Размеры, мм										
	подготовленных кромок свариваемых деталей	шва сварного соединения		s = s ₁	b		c		e		g			
					Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.	Номин.	Пред. откл.	от град. (пред. откл. ±2°)	
С15			ИНп	6-9					7					
				10-12					9					
				14-16	1	±1	1	±1	13					
				18-20					17					
				8-11					8			±2		
				12-14					10					
				16-20					12					
				22-26					16					
				28-32					18					
				34-38					22					
	40-44					26								
	46-50	2	+1 -2	2	+1 -2	30			2	+1 -2				
	52-56					34								
	58-62					38			±3					
	64-70					42								
	72-80					46			±4					
	82-90					50								
	92-100					54			±5					

Рис. 3. Схема стыковки образцов С15-ИП по ГОСТ 14771-76

Результаты сварки в среде защитных газов подтверждают тенденцию, выявленную при сварке под флюсом, но результаты лучше, так как тепловложение меньше, чем при сварке под флюсом.

Результаты и обсуждение. Нормализованная сталь, независимо от способа сварки, формирует сварное соединение с высокими и стабильными показателями ударной вязкости во всех зонах. Сталь



КП+УО, напротив, продемонстрировала критическую потерю свойств в ЗТВ. При этом способ сварки ИП, с несколько меньшей погонной энергией, позволил получить несколько более высокие, но все еще недостаточные значения вязкости по сравнению со сваркой под флюсом, что указывает на прямую зависимость "тепловложение - деградация свойств".



Рис. 4. Образец, сваренный по ГОСТ 8713-79 (КП+УО)



Рис. 5. Образец, сваренный по ГОСТ 8713-79 (Н)

В образцах из стали КП+УО в области сварного соединения под действием термических циклов происходят необратимые структурные изменения. На микрошлифах (рис. 4, 6) отчетливо наблюдается:

– Структурная неоднородность: формирование участков с разнотекстурностью, где наряду с мелкими зернами присутствуют крупные, выросшие в результате рекристаллизации при перегреве (участок ЗТВ с температурами $>1100^{\circ}\text{C}$).

– Полосчатость: наследование исходной полосчатости проката, усугубленное диффузионными процессами. Наблюдаются грубые вытянутые зерна перлита и карбидные цепочки, ориентированные вдоль направления прокатки. Это является прямой причиной анизотропии свойств.

– Крупнозернистая структура в ЗТВ: в зоне перегрева фиксируется рост аустенитного зерна до размеров, в десятки раз превышающих исходные. Такая

структура обладает низкой сопротивляемостью хрупкому разрушению.

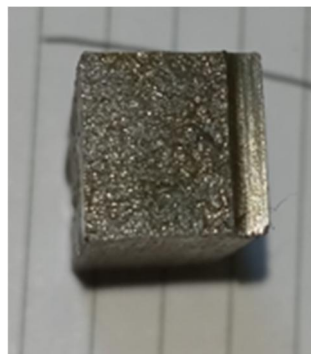


Рис. 6. Образец, сваренный по ГОСТ 14771-76 (КП+УО)



Рис. 7. Образец, сваренный по ГОСТ 14771-76 (Н)

Микроструктура образцов из нормализованной стали (рис. 5, 7) в зоне стыка и сплавления характеризуется высокой степенью однородности и мелкозернистостью. Основу структуры составляет сорбитообразный перлит и феррит с равномерно распределенными мельчайшими карбидными включениями. Нагрев при сварке в зоне нормализации ($900-1000^{\circ}\text{C}$) приводит к дополнительному измельчению зерна, что благоприятно сказывается на вязкости. В ЗТВ формируется выровненная структура с зернами примерно одинакового размера, что обеспечивает высокую ударную вязкость во всем исследуемом диапазоне. Полученные экспериментальные данные хорошо согласуются с результатами исследований, опубликованных в работе [4], где изучалось влияние термических циклов, близких к сварочным, на сталь 10ХСНД-2 (КП+УО). В статье исследовалось влияние локального нагрева (имитация термической правки) на свойства стали. Авторы установили, что нагрев в интервале $850-930^{\circ}\text{C}$ приводит к снижению предела текучести на 10–15 %, падению ударной вязкости до 10 раз ниже нормативных и уменьшению доли вязкой составляющей в изломе.

Процесс сварки характеризуется неравномерным нагревом металла, что позволяет выделить в ЗТВ несколько областей с различными температурными пиками (рис. 8) [14; 19]:

1. Зона сварного шва: расплавленный металл ($T > 1500^{\circ}\text{C}$);
2. Зона термического влияния (ЗТВ).

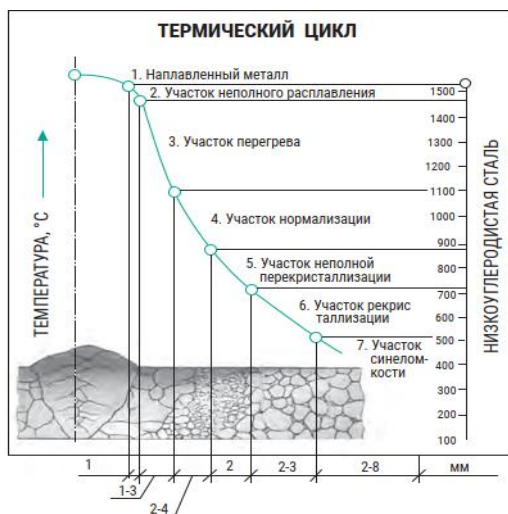


Рис. 8. Температурные зоны сварного шва

Сопоставляя данные статьи [4] с температурными зонами сварки, можно заключить, что для стали 10ХСНД (КП+УО) наиболее опасными являются участки ЗТВ, где металл нагревается выше 850°C – это участки перегрева, нормализации и особенно неполной перекристаллизации ($750-900^{\circ}\text{C}$), где формируется структурно неоднородная смесь. Таким образом, для сохранения свойств стали КП+УО при сварке необходимо жестко ограничивать тепловложение, минимизируя объем металла, нагреваемого выше критической точки A_{c3} ($\approx 850^{\circ}\text{C}$).

Сварка под флюсом характеризуется высоким эффективным КПД нагрева изделия ($\eta = 0,85...0,95$) [19]. Традиционные режимы АФ, оптимизированные для нормализованных сталей, часто сопровождаются значительным тепловложением (более $30-40$ кДж/см), что для стали КП+УО приводит к длительному пребыванию металла в интервале температур перегрева ($>1100^{\circ}\text{C}$). Это вызывает неконтролируемый рост аустенитного зерна, формирование видманштеттовой структуры и, как следствие, резкое охрупчивание. Для снижения негативного влияния термического цикла при сварке под флюсом применяются технологические приемы, направленные на уменьшение погонной энергии:

- Сварка пульсирующей дугой (СФИ): исследования [18] показывают, что импульсный режим позволяет примерно в два раза сократить длительность пребывания металла ЗТВ при температурах свыше 1000°C и на 30% сократить время охлаждения в диапазоне $800-500^{\circ}\text{C}$. В результате ширина участка крупного зерна в ЗТВ уменьшается, а средний размер зерна аустенита снижается в 2–3 раза;

- Сварка с использованием ленточных электродов: увеличивается коэффициент расплавления и

снижается погонная энергия за счет более равномерного распределения тепла по ширине шва [18];

- Оптимизация режимов: снижение тока и повышение скорости сварки.

Процесс MAG также вносит значительное количество тепла ($\eta \approx 0,7-0,85$). Эксперименты показали, что даже для этого, более гибкого процесса, стандартные режимы являются чрезмерно жесткими для стали КП+УО.

Современные методы управления тепловложением при ИП-сварке включают:

- сварка с управляемым переносом электродного металла: RMD (Regulated Metal Deposition), STT (Surface Tension Transfer), CMT (Cold Metal Transfer), основаны на точном управлении током и напряжением в процессе короткого замыкания. Это позволяет радикально (до $10-15$ кДж/см) снизить погонную энергию и практически исключить перегрев металла. Экспериментально подтверждено сокращение энергозатрат на формирование шва до 35% (а в оптимальных режимах до 83%) по сравнению с традиционным процессом;

- металлпорошковые проволоки: POWER BRIDGE 60M [15; 17] обеспечивают высокое качество формирования шва и механические свойства металла шва даже при пониженном тепловложении;

- двухструйная газовая защита: более эффективный отвод тепла от сварочной ванны и сниженный локальный перегрев, уменьшая градиент микротвердости в ЗТВ.

Таким образом, для стали 10ХСНД (КП+УО) применение традиционных режимов сварки недопустимо. Переход на технологии с контролируемым тепловложением (импульсно-дуговая сварка под флюсом, CMT/RMD при MAG-сварке) является необходимым условием получения качественных и надежных сварных соединений.

Выводы:

1. Экспериментально подтверждено, что технология изготовления металла оказывает определяющее влияние на свариваемость стали 10ХСНД-2. Сталь в состоянии поставки КП+УО демонстрирует высокую чувствительность к сварочному нагреву. Попадание металла ЗТВ в критический температурный интервал (выше $\approx 850^{\circ}\text{C}$) приводит к деградации исходной метастабильной структуры и значительному падению ударной вязкости KCU^{-60} . Во всех исследованных образцах и при всех способах сварки значения ударной вязкости в ЗТВ оказались ниже нормативного порога 29 Дж/см², достигая в отдельных зонах (линия сплавления при АФ) средних значений $16,3$ Дж/см².

2. Нормализованная сталь 10ХСНД-2, напротив, показала высокую технологичность при сварке обоими способами. Сформировавшаяся в ЗТВ однородная мелкозернистая структура обеспечивает ста-



бильно высокие значения ударной вязкости (в среднем 150-200 Дж/см²) во всех контрольных точках.

3. Металлографический анализ выявил прямую корреляцию между низкими значениями ударной вязкости и структурными изменениями в ЗТВ стали КП+УО: ростом зерна в зоне перегрева, формированием полосчатости и структурной неоднородности на участке неполной перекристаллизации.

4. Установлено, что для сохранения требуемого уровня свойств стали КП+УО в сварных соединениях необходим строгий контроль погонной энергии и применение специализированных технологий сварки с пониженным тепловложением (импульсно-дуговые процессы, сварка с управляемым переносом металла). Использование традиционных, отлаженных для нормализованных сталей, режимов сварки недопустимо и может привести к преждевременному разрушению конструкций в эксплуатации.

Библиографический список

1. ГОСТ 6713-2021: межгосударственный стандарт: дата введения 2022-03-15. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200175632> (дата обращения: 08.04.2026).

2. ГОСТ 6713-1991: межгосударственный стандарт: дата введения 1992-07-01. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/9055466> (дата обращения: 08.04.2026).

3. Сергеев А.А., Звирь В.И. У каждой проблемы есть «фамилия, имя и отчество» // Дороги. Инновации в строительстве. – 2023. – № 114. – С. 20–23.

4. Сергеев А.А., Звирь В.И. ГОСТ 6713-2021 - это мина в стальном мостостроении, но уже совсем не замедленного действия // Дороги. Инновации в строительстве. – 2024. – № 117. – С. 78–81.

5. Ботвина Л.Р., Тютин М.Р., Демина Ю.А., Белецкий Е.Н., Куницын Г.А., Нижельский Д.В. Влияние режимов обработки и ориентации образцов на механические характеристики и механизмы разрушения стали 10ХСНД при ударном и статическом изгибе // Металлы. – 2024. – № 4. – С. 51–67.

6. Харламов Д.Н. С позиции Трансстройпроекта: чем не прост новый ГОСТ // Дороги. Инновации в строительстве. – 2022. – № 101. – С. 20–22.

7. Эфрон Л.И. Металловедение в «большой» металлургии. Трубные стали. – М. :Металлургиздат, 2012. – 696 с.

8. Морозов Ю.Д., Пемов И.Ф., Матросов М.Ю., Зинько Б.Ф. Стали для мостовых конструкций // Металлург. – 2019. – № 9. – С. 50–61.

9. ГОСТ Р 55374-2012: национальный стандарт Российской Федерации: дата введения 2012-12-27. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200098194> (дата обращения: 08.04.2026).

10. СП 35.13330.2011: свод правил: дата введения 2011-05-20. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200084578> (дата обращения: 08.04.2026).

11. СТО-ГК «Трансстрой»-012-2018: стандарт организации: дата введения 2018-03-20. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/561831202> (дата обращения: 08.04.2026). (Примечание: ссылка на документ в открытом доступе может отсутствовать, приведен типовой URL).

12. ГОСТ 8713-79: межгосударственный стандарт: дата введения 1981-01-01. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901710835> (дата обращения: 08.04.2026).

13. ГОСТ 14771-76: межгосударственный стандарт: дата введения 1977-07-01. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901710819> (дата обращения: 08.04.2026).

14. Голиков Н.И., Санников И.И., Семёнов С.В., Иванов М.А. Термические циклы, структура и свойства неразъемных соединений конструкционных сталей при сварке в условиях экстремального холода // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. Материаловедение и химические технологии. – 2024. – С. 479–491.

15. Щетинин С.В. Влияние формы электрода и погонной энергии на термические циклы и микроструктуру наплавленного металла при сварке под флюсом // Сварочное производство. – 2019. – № 8. – С. 3–9.

16. Теория сварочных процессов / Под ред. В.М. Неровного. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. – 702 с.

17. Макаров Э.Л. Холодные трещины при сварке легированных сталей. – М. : Машиностроение, 1981. – 247 с.

18. Ушаков А.Д. Сварные соединения. Определение размеров участков зоны термического влияния // III Научно-практическая конференция «Стандартизация: траектория науки», приуроченная ко Всемирному дню стандартов, Москва 15 октября 2025 года // Информационно-экономические аспекты стандартизации и технического регулирования. – 2025. – № 6(87). – С. 276–279.

19. ГОСТ 6996-66: межгосударственный стандарт: дата введения 1967-01-01. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901710820> (дата обращения: 08.04.2026).

20. ГОСТ 9454-78: межгосударственный стандарт: дата введения 1979-01-01. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/901710834> (дата обращения: 08.04.2026).

21. ГОСТ 2246-70: межгосударственный стандарт: дата введения 1973-01-01. // Кодекс : электрон. фонд правовой и норматив.-техн. информ. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200022906> (дата обращения: 08.04.2026).

22. Левенец Р.Ю. Обзор проблем и перспектив применения ГОСТ 6713-2021 // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2025. – С. 54–59.

23. Есипов С.М., Мишенин О.В. Напряженно-деформированное состояние реконструируемых железобетонных при изгибе // Вестник Белгородского государственного университета им. В.Г. Шухова. – 2026. – № 1. – С. 58–69.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 30.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 30.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья
УДК 69.04
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения
doi:10.51608/26867818_2026_2_113

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ

© Авторы, 2026
SPIN: 2996-1425

НИКОЛЮКИН Алексей Николаевич
к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Конструкции зданий и сооружений»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: valax1@yandex.ru)

SPIN: 4048-5225

АНТОНОВ Василий Михайлович
к.т.н., доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов)

SPIN: 8674-6046

МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук,
директор института Архитектуры, строительства и транспорта
Тамбовский государственный технический университет; РААСН
(Россия, Тамбов, e-mail: monastyrev68@mail.ru)

ЛИСОВСКИЙ Владислав Александрович
магистрант
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов)

Аннотация. Рассмотрен нормативно-ориентированный подход к формированию синтетической обучающей выборки для нейросетевого моделирования расчётных сопротивлений грунта под нижним концом сваи R и на боковой поверхности f_i в задачах проектирования забивных свай трения. Показано, что табличный аппарат СП 24.13330.2021 имеет дискретный характер по глубине и параметрам состояния грунта, вследствие чего при практических расчётах требуется интерполяция и учёт примечаний к таблицам. Предложена система признаков для глинистых и песчаных грунтов, согласованная с классификацией ГОСТ 25100–2020 (включая показатель текучести I_L , коэффициент пористости e , гранулометрический состав песков). Обоснована схема генерации нормативной синтетики с учётом требований нормативных документов и ограничений области применимости. Сформулированы требования к обучению и валидации нейросетевых аппроксиматоров, включая контроль монотонности и физической согласованности прогнозов.

Ключевые слова: свайные фундаменты; синтетическая выборка; нейросетевая аппроксимация; расчётные сопротивления R и f_i ; монотонность модели

Для цитирования: Использование нейросетевого моделирования для определения несущей способности забивных свай / А.Н. Николюкин, В.М. Антонов, П.В. Монастырев, В.А. Лисовский // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 113-123. doi:10.51608/26867818_2026_2_113.

Original article

USING NEURAL NETWORK MODELING TO DETERMINE THE CARRYING CAPACITY OF PUNCHED PILES

© Authors, 2026

NIKOLYUKIN Alexey Nikolaevich
Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)



ANTONOV Vasily Mikhaylovich

Candidate of Technical Sciences
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)

MONASTYREV Pavel Vladislavovich

Corresponding Member of the RAASN, doctor of technical sciences,
Director of the Institute of Architecture, Construction and Transport
Tambov State Technical University; RAACS
(Russia, Tambov, e-mail: monastyrev68@mail.ru)

LISOVSKY Vladislav Aleksandrovich

Master's student
Tambov State Technical University; RAACS
(Russia, Tambov)

Abstract. A regulatory oriented approach to forming a synthetic training dataset for neural network modeling of design soil resistances — under the pile tip (R) and along the side surface (f_i) — in the design tasks of friction driven piles is considered. It is shown that the tabular framework of SP 24.13330.2021 has a discrete nature with respect to depth and soil state parameters; as a result, practical calculations require interpolation and consideration of table notes. A system of attributes for clayey and sandy soils, consistent with the classification of GOST 2510-2020, is proposed (including the liquidity index I_L , void ratio e , and grain size distribution of sands). A scheme for generating normative synthetic data is substantiated, taking into account the requirements of regulatory documents and limitations of the applicability domain. Requirements for training and validation of neural network approximators are formulated, including control of monotonicity and physical consistency of predictions.

Keywords: pile foundations; synthetic dataset; neural network approximation; design resistances R and f_i ; model monotony

For citation: Using neural network modeling to determine the carrying capacity of punched piles / A.N. Nikolyukin, V.M. Antonov, P.V. Monastyrev, V.A. Lisovsky // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 113-123. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_113.

1. Введение. Построение и практическое применение нейросетевых моделей в задачах проектирования свайных фундаментов неизбежно упирается в ключевой вопрос [1-7]: для устойчивого обучения нейронной сети требуется большой, репрезентативный и качественно размеченный массив данных, охватывающий разнообразие грунтовых условий, параметров свай и режимов работы системы «свая–основание». В геотехнике формирование таких массивов осложнено высокой природной изменчивостью грунтов [8-16], ограниченным объёмом инженерно-геологических изысканий на каждом объекте, а также стоимостью и длительностью получения достоверных натуральных значений (несущая способность, осадки, сопротивление по боковой поверхности и т.п.). Следовательно, до постановки и обучения нейросетевых моделей необходимо обосновать источники данных, метод их унификации и расширения, а также способы контроля корректности полученной выборки.

На практике можно выделить несколько основных подходов к формированию данных для нейросетевого моделирования в геотехнике [7-8; 10-15]:

• *Натурные испытания и полевые исследования (статические/динамические испытания свай, результаты статического зондирования, штамповые испытания и др.).* Данные наиболее «физиче-

ски достоверны», но получение больших выборок ограничено стоимостью и доступностью, а также неоднородностью методик измерений и оформления результатов.

• *Данные геотехнического мониторинга (осадки, перемещения, напряжения/давления, показания датчиков в процессе строительства и эксплуатации).* Мониторинг позволяет накапливать данные в реальном времени и учитывать фактическое поведение системы, однако требует времени, инфраструктуры наблюдений и часто не содержит «прямых» целевых величин в виде, удобном для обучения (их приходится восстанавливать через обратный анализ).

• *Синтетические данные на основе численных моделей (МКЭ моделирование с варьированием параметров, численные испытания).* Этот путь даёт большие массивы данных, но требует калибровки конститутивных моделей грунта, задаёт вычислительную нагрузку и может переносить в датасет систематические ошибки принятой модели).

• *Синтетические данные на основе аналитических и нормативных моделей (формулы, таблицы сводов правил и стандартов).* Этот подход особенно эффективен для задач, где требуется строгое соответствие нормативной базе и воспроизводимость расчётов в инженерной практике.



В рамках настоящей работы выбран и реализован нормативно-ориентированный подход формирования данных: для решения задач, связанных с проектированием забивных свай трения (включая оценку расчётных сопротивлений грунта под нижним концом сваи и по боковой поверхности), целевые зависимости задаются нормативными таблицами и правилами, а также классификацией грунтов. При этом табличные значения норм имеют дискретный характер (по глубинам, показателю текучести, видам песка и т.д.), поэтому для получения репрезентативного массива обучающих данных выполняется генерация синтетической выборки: интерполяция по нормативным узлам, расширение параметрического пространства в пределах области применимости, а также учёт поправочных коэффициентов и условий, регламентированных нормативными документами.

Нейронная сеть в данной постановке выступает как универсальный аппроксиматор нормативных зависимостей, переводящий дискретный набор правил и таблиц в непрерывную «машиночитаемую» модель. После обучения такая модель позволяет [1; 6-7; 15-16]:

- мгновенно получать значения расчётных сопротивлений для произвольных сочетаний входных параметров в допустимых диапазонах;
- выполнять массовые многовариантные расчёты (оптимизация длины/сечения свай, сравнение решений, анализ чувствительности);
- использовать нейросеть как быстрый суррогат нормативного расчёта в составе инженерного алгоритма.

Дальнейшие исследования посвящены формализации входных параметров для глинистых и песчаных грунтов, (методике синтеза обучающих данных с учётом всех нормативных условий и поправок, архитектуре и настройкам нейросетевой модели, процедурам обучения и проверке качества/физической согласованности полученных зависимостей.

2. Постановка задачи. Проектирование свайных фундаментов традиционно базируется на нормативных расчетах несущей способности свай по СП и актуализированным сводам правил. Для каждой сваи определяется расчётное сопротивление грунта под нижним концом R и на боковой поверхности f_i на участке i слоя грунта [2]. Данные величины зависят от типа грунта и его состояния, а нормативные значения заданы в СП 24.13330.2021 таблично для дискретных категорий грунтов и глубины расположения расчетного слоя [2]. Подход с использованием нейросетей состоит в том, чтобы создать модели, приближающие эти нормативные зависимости и результаты полевых испытаний более непрерывным и обобщающим образом. В данной работе представ-

лена методика проектирования свайных фундаментов с применением нейросетей, учитывающая требования СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты» и классификацию грунтов по ГОСТ 25100–2020[2]. Особое внимание уделено различиям между глинистыми и песчаными грунтами, способу генерации дополнительных («синтетических») данных на основе норматива, архитектуре нейросетевых моделей для расчётных сопротивлений R и f , а также процедурам обучения моделей. Цель состоит в формировании согласованной модели, способной учитывать особенности грунтов и обеспечивать монотонность предсказаний в соответствии с физическими закономерностями.

3. Структура и система признаков входных данных. Входные данные для построения нейросетевых моделей формируются таким образом, чтобы полностью воспроизводить набор параметров, используемых в СП 24.13330.2021 при назначении расчётных сопротивлений грунта под нижним концом сваи (R) (табл. 7.2) и на боковой поверхности сваи (f_i) (табл. 7.3). Соответственно, обучающая выборка состоит из двух типов записей [2; 16]:

1. Записи для модели (R), где каждая точка соответствует грунту под нижним концом сваи на глубине погружения (l).
2. Записи для модели (f_i), где каждая точка соответствует отдельному слою грунта толщиной (h_i) (при этом используется средняя глубина расположения слоя (h_i) в соответствии с СП)

При подготовке данных глубину погружения нижнего конца сваи и среднюю глубину слоя следует отсчитывать от уровня, определяемого условиями площадки (включая случаи планировки территории срезкой/подсыпкой/намывом и т. п.), согласно примечаниям к табл. 7.2 (и с учётом того, что табл. 7.3 отсылает к соответствующим примечаниям табл. 7.2) [2; 16]. Для промежуточных значений параметров норматив допускает определение (R) и (f_i) интерполяцией, поэтому в синтетических данных фиксируется непрерывная зависимость выходов от глубины и показателей состояния грунта (интерполяция реализуется на этапе генерации/разметки целевых значений).

Для глинистых грунтов ключевым параметром состояния является показатель текучести (I_L). Поскольку табличные значения в СП задаются при дискретных (I_L), а для расчётов предписано принимать (I_L) по прогнозируемому состоянию грунта в период эксплуатации, то (I_L) вводится в модель как количественный признак, отражающий консистенцию основания и обеспечивающий корректную интерполяцию нормативной зависимости [1; 15].

Дополнительно в признаковом описании глинистых грунтов включается коэффициент пористости (e) (если он установлен изысканиями), поскольку СП



предусматривает поправку к боковому сопротивлению: для супесей и суглинков при ($e < 0,5$) и для глин при ($e < 0,6$) значения (f_i) по табл. 7.3 следует увеличивать на 15% независимо от (I_L). Для корректного применения данной нормы в данных фиксируются [2]:

- тип глинистого грунта (категориальный признак: супесь/суглинок/глина — в той группировке, которая используется при назначении табличных (R) и (f_i));

- показатель текучести (I_L) (численный признак);

- коэффициент пористости (e) (численный признак) и/или бинарный индикатор выполнения условий ($e < 0,5$) (для супесей/суглинков) или ($e < 0,6$) (для глин) для учёта нормативной надбавки к (f_i) [2].

Для песков принципиально важно разделять две независимые характеристики, заданные нормативно:

1. Гранулометрический состав - (гравелистый, крупный, средней крупности, мелкий, пылеватый));

2. Коэффициент пористости (пески естественного сложения подразделяются на плотные / средней плотности / рыхлые).

Кроме этого, в нейросетевую модель для песчаных грунтов дополнительно включается бинарный индикатор «песок плотный» (X_{dense}) (формируется по (e) в соответствии с ГОСТ), поскольку СП для плотных песков задаёт отдельные поправки к (R) и (f_i) по сравнению с базовыми значениями для песков средней плотности.

Помимо характеристик грунта, СП содержит указания, влияющие на применимость и корректировку табличных значений, которые должны быть отражены в структуре данных:

- для модели (f_i) слоистое основание представляется в виде набора однородных слоёв толщиной не более 2 м; следовательно, в записи для (f_i) фиксируются параметры слоя (h_i) и/или его средняя глубина (рис.1);

- при необходимости могут учитываться специальные нормативные случаи (например, увеличение (f_i) для отдельных типов сооружений в глинистых грунтах при заданных диапазонах (I_L)), которые целесообразно задавать отдельным бинарным флагом применения поправки на этапе генерации синтетических данных.

При представлении входных параметров для обучения нейронной сети все количественные параметры ((l) , (h_i), (I_L), (e)) (а при необходимости также (I_p)), если рассматриваются специальные условия для супесей) приводятся к численному виду и нормируются (масштабируются) по выбранной схеме (min-max или z-нормировка). Категориальные параметры (вид/группа грунта, группа крупности песка) кодиру-

ются в виде фиктивных переменных (one-hot) или упорядоченных кодов — в зависимости от выбранной архитектуры сети.

Целевыми переменными являются: (R) (кПа) — для модели расчётного сопротивления грунта под нижним концом сваи и (f_i) (кПа) — для модели расчётного сопротивления грунта на боковой поверхности сваи в пределах слоя (i). Обучающая выборка формируется как совокупность фактических данных (при наличии) и синтетических данных, размеченных по нормативным таблицам с учётом интерполяции и предусмотренных СП поправок.

4. Нормативные зависимости для определения несущей способности свай. Для оценки несущей способности свай в РФ используются нормы, заложенные в актуализированном своде правил СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты» (обновленная редакция СНиП 2.02.03–85) [1]. В этом документе регламентированы полевые и аналитические методы определения несущей способности забивных свай.

Следует отметить, что нормативные таблицы охватывают лишь конечное число дискретных случаев. Например, для глинистых грунтов, таблица 7.2 приведена для фиксированных значений глубины l (3 м, 4 м, 5 м, 7 м, 10 м, 15 м, 20 м, ... до 40 м) и для нескольких градаций I_L (вплоть до 0.5–0.6). Значения для промежуточных величин параметров должны определяться интерполяцией [2]. Аналогично, таблица 7.3 для f_i содержит ограниченный набор градаций I_L - с шагом 0.1–0.2 для глинистых грунтов.

Таким образом, нормативная база предоставляет надежные исходные точки, но не дает готового решения для любой произвольной комбинации параметров. Это обосновывает необходимость создания непрерывной модели для $R(I_L, L)$ и $f(I_L, h)$, способной выдавать значения расчетных сопротивлений для произвольного I_L и глубины, оставаясь при этом в русле нормативных требований [2].

В целом, из таблицы 7.2 следует закономерность: с увеличением глубины погружения сваи расчётное сопротивление R возрастает для глинистых и песчаных грунтов, причём в плотных песчаных грунтах R достигает значительно больших величин, чем в глинистых грунтах с высоким числом пластичности. Для иллюстрации, на рис. 1 показано изменение R по глубине для песка крупного и мелкого (средней плотности), а также для глины с $I_L = 0,2$ и $I_L = 0,5$ по табличным данным СП. Видно, что на глубине 10 м крупный песок обеспечивает $R > 10$ МПа, мелкий песок около 7–8 МПа, тогда как для мягкопластичной глины R менее 1 МПа. Эти различия подчёркивают важность учёта типа грунта и его состояния при моделировании несущей способности.

Согласно таблице 7.3, сопротивление f_i увеличивается с глубиной, однако достигает некоторого

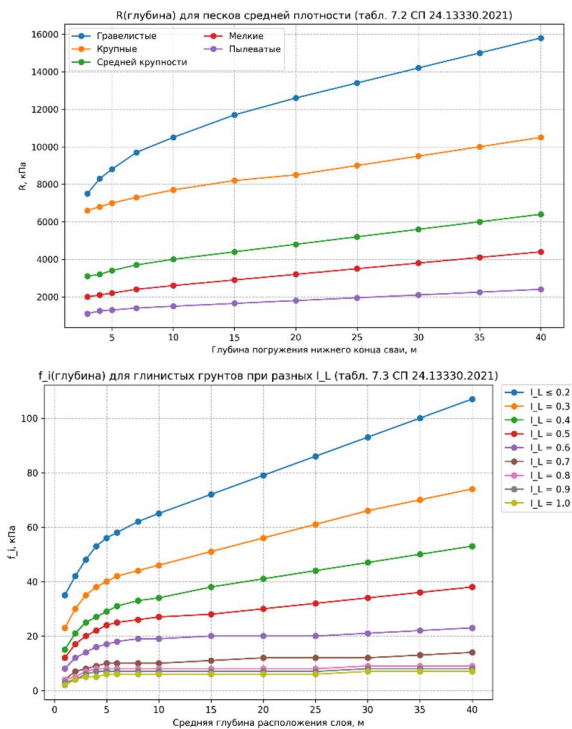


Рис. 1. Расчетное сопротивление R под нижним концом сваи в зависимости от глубины погружения для разных типов грунтов (по данным СП 24.13330.2021 [4; 12])

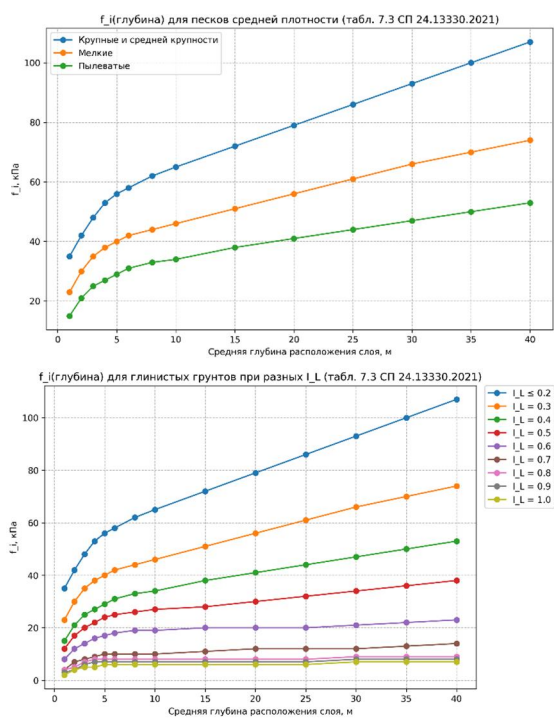


Рис. 2. Расчетное сопротивление грунта f на боковой поверхности сваи в зависимости от глубины слоя для разных типов грунтов (по данным СП 24.13330.2021)

плато в глубоких слоях для слабых грунтов. Так, для крупного песка f_i возрастает примерно от 35 кПа на глубине 1 м до 79 кПа на глубине 20 м, тогда как для мягкопластичного глинистого грунта ($I_L \approx 0,7$) рост ограничен: с 2–4 кПа вблизи поверхности до около

6 кПа на глубинах 10–20 м [16–17]. На рис. 2 приведены типичные кривые по таблице 7.3: для крупного и мелкого песка средней плотности, а также для глинистых грунтов с $I_L = 0,2$ (полутвердого состояния) и $I_L = 1$ (текучепластичного состояния). Хорошо заметно, что песчаные грунты обеспечивают существенно большими значениями бокового сопротивления, чем слабые глины, и что для глинистых грунтов при $I_L > 0,5$ увеличение f_i с глубиной замедляется [2].

Нормы предусматривают также ряд поправочных коэффициентов, позволяющих учитывать отклонения от табличных значений. В примечаниях к таблицам 7.2 и 7.3 приведены правила корректировки табличных значений [2]:

- *Плотные пески.* Нормативные значения R из таблицы 7.2 для сваи, погруженной без размыва и лидерных скважин, увеличиваются на 100% для крупных и средней крупности песков и на 130% для мелких и пылеватых песков [2; 12]. При отсутствии данных зондирования (при условии, что по результатам других изысканий песок классифицирован как плотный) увеличения несколько меньше: на 60% – для крупных и средних и на 75% – для мелких и пылеватых, притом с обязательным ограничением $R \leq 20\,000$ кПа [18]. Таким образом, предельное расчетное сопротивление под нижним концом сваи независимо от условий ограничивается 20 МПа [2]. Для бокового трения плотных песков приводится примечание, что значения f_i из таблицы 7.3 следует увеличивать на 30% [2]. Эти поправки отражают то, что плотный песок обеспечивает большую несущую способность, а статическое зондирование позволяет надежнее идентифицировать степень плотности, оправдывая большой резерв (100% или 60–75%) [2].

- *Коэффициент пористости глинистых грунтов.* Примечание 4 к табл. 7.3 предписывает для супесей и суглинков с $e < 0,5$ и глин с $e < 0,6$ увеличивать значения f_i на 15% независимо от I_L [2]. Аналогичная поправка в табл. 7.2 (примечание 8) указывает, что при расчёте следует принимать I_L грунтов по их прогнозируемому состоянию в период эксплуатации [2].

Кроме этого, в примечании 5 к табл. 7.2 свод правил устанавливает требуемое минимальное заглубление сваи в несываемый несрезаемый грунт: не менее 4 м для мостов и гидротехнических сооружений и 3 м для прочих сооружений [2]. В нашем контексте это ограничение означает, что расчетные значения R таблицы справедливы при достаточной глубине расположения нижнего конца сваи в несущем слое.

Таким образом, СП предоставляет детальную картину зависимости несущей способности от характеристик грунта. Перед разработкой моделей необходимо сгенерировать набор данных, охватываю-



щий диапазоны параметров грунтов и включающий указанные поправки.

5. Генерация синтетической выборки. Экспериментальные данные по испытаниям свай (например, статическими нагрузками или результатам СЗ) не всегда достаточно покрывают все типы грунтов и условия. Поэтому для расширения обучающей выборки была сгенерирована синтетическая выборка на основе нормативных зависимостей. Основные шаги формирования таких данных:

- *Интерполяция нормативных таблиц.* Значения R и f_i для промежуточных значений глубины L , показателя текучести I_L и коэффициента пористости определяются интерполяцией по табл. 7.2 и 7.3 [2]. Например, если нужно сгенерировать данные для глины с $I_L = 0,33$ на глубине 8 м, берутся ближайшие уровни таблицы (например, для $I_L = 0,3$ и $0,4$; для глубин 7 м и 10 м) и производится двукратная линейная интерполяция. Такой подход обеспечивает плавность в данных и непротиворечивость с нормативной поверхностью $R(L, I_L)$ и $f(L, I_L)$.

- *Генерация по виду песка.* Для каждого вида песка (гравелистый, крупный, средней крупности, мелкий, пылеватый) генерируются данные отдельно, так как нормативные значения существенно различаются по крупности. Поэтому синтетическая выборка включает множество точек, покрывающих диапазон глубин (например, 3–20 м с шагом 0,5–1 м) для каждого вида песка. Тем самым нейросеть сможет учитывать категорию песка через входные параметры.

Глубины более 30 м хотя и встречаются (табл. 7.2 идёт до 40 м), но для обучения модели их вклад невелик и в данной работе ограничились 20 м, чтобы не выходить за рамки большинства практических случаев фундаментов. По грунтам: генерация для глины I_L охвачена от 0 до 1 (выше 0,6 не генерировались точки, т.к. $I_L = 0,6$ – слабый грунт; допускается несколько точек до 0,7–0,8 лишь для учёта асимптотического поведения f). Для песков интерполяция выполнена для всех групп крупности (пылеватые, мелкие, средней крупности, крупные пески) на глубину до 40 м.

- *Размер выборки.* После интерполяции было получено порядка $N_R \approx 2500$ точек для функции $R(I_L, L)$ (глины) и аналогично несколько тысяч точек для R (пески), а для функции $f(I_L, H)$ – порядка $N_f \approx 1500$ точек (ввиду более ограниченного диапазона f). Совокупно обучающие данные содержали несколько тысяч примеров. Каждый пример представлялся как набор входов (I_L, L) или (тип песка, e, L) и целевое значение R или f . Сформированная выборка затем была разделена на обучающую, тестовую части (например, 80%/20%). Тестовая – для окончательной независимой оценки точности модели. Такое разбиение обеспечивает объективность – метрики оцениваются на тех точках, которые не участвовали в обучении нейросети.

В результате подготовлена надёжная синтетическая база, полностью основанная на нормативных зависимостях, но представленная в удобной для нейросети форме (сплошное поле данных). Ее ис-

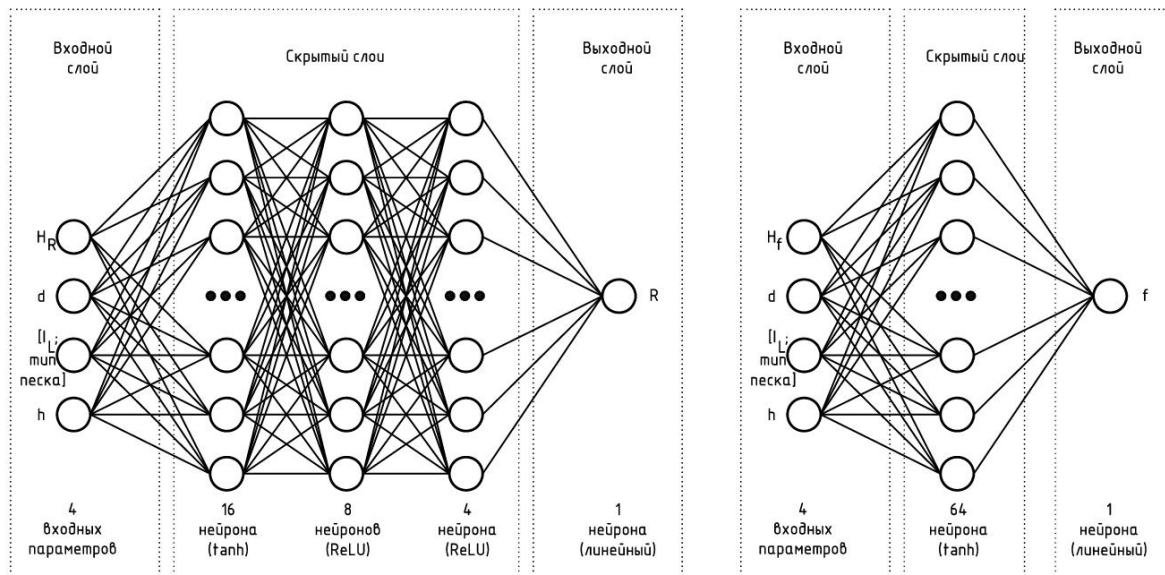


Рис. 3. Архитектура искусственных нейронных сетей R и f

- *Диапазоны параметров* [2]. Генерация охватывает глубины заложения свай от 3 м (минимум, рассматриваемый в таблицах) до порядка 20–30 м.

пользование позволило преодолеть дефицит экспериментальных точек и обеспечить обучение модели на всем диапазоне условий.



6. Архитектура нейросетевых моделей для определения R и f

Для аппроксимации зависимости R и f была разработана модель на основе нейронных сетей прямого распространения (multilayerperceptron). В рамках задачи регрессии модель принимала два входа (характеристики грунта и геометрический параметр – глубину расположения) и выдавала одно выходное значение (прогноз расчетного сопротивления грунта). Архитектура, общая для обеих целевых функций, (включала один для зависимости f и 3 для зависимости R слоя) представлена на рис. 3.

Ключевым моментом было обеспечение физически обоснованной монотонности выходов по отношению к каждому входу. Для этого при выборе функций активации учитывался характер целевых зависимостей:

Для модели R выходная функция активации выбрана в виде экспоненты. То есть на последнем слое нейронной сети вычисляется $R = \exp(y)$, где y – линейная комбинация выходов скрытого слоя. Экспоненциальная функция обеспечивает положительное значение прогнозируемого R (что естественно, так как сопротивление грунта не может быть отрицательным) и задаёт убывающую зависимость от I_L и или вида песчаного основания, если вес связей между нейронами при линейной комбинации y отрицательный.

В то же время экспоненциальная зависимость позволяет хорошо аппроксимировать резкое возрастание R при малых I_L (как показано на рис. 1, кривая падает почти экспоненциально при переходе от $I_L \approx 0$ к $I_L = 0.5$). Для учета влияния глубины L на R нейронная сеть задействовала отдельные нейроны скрытого слоя: его вес при L оказался положительным, что означало монотонный рост экспоненты R с увеличением L .

Для модели f на выходе сети использована Softplus-активация, задаваемая формулой $\text{softplus}(z) = \ln(1 + e^z)$. Функция softplus, с одной стороны, также гарантирует положительный выход (при любом z $\text{softplus}(z) > 0$), а с другой – она является возрастающей и дифференцируемой аппроксимацией ReLU (RectifiedLinear Unit). В контексте нашей задачи softplus оказалась удобной, так как по характеру графики $f(h)$ напоминают сглаженную кусочно-линейную функцию: на малых глубинах f растет почти линейно, затем на больших – выходит на насыщение (что соответствует переходу аргумента z в область $z \gg 0$, где $\text{softplus}(z) \approx z$, то есть рост почти линейный). Обученная сеть задала аргумент z таким образом, что для больших h softplus входила в квазилинейный режим, отражая продолжающийся рост f , а для больших значений I_L аргумент z оставался отрицательным и небольшим по модулю, давая выход softplus около константы (в соответствии с

насыщением графиков на рис. 2 для текучих грунтов). Кроме того, softplus-активация, будучи сглаженной, облегчает сходимость обучения по сравнению с кусочно-линейными функциями, устраняя разрывы производной.

Обучение нейронных сетей производилось методом Левенберга–Марквардта (LM) на сгенерированных синтетических данных. В качестве функции потерь использовалась среднеквадратичная ошибка (MSE) и Huber-потерь между предсказанными и табличными значениями. Обучение проводилось до сходимости ошибки (порядка 10^{-3} – 10^{-4} в нормированных единицах), при этом для контроля обобщающей способности использовалась k-fold кросс-валидация (данные разбивались на 5 частей, последовательно 4 из них использовались для обучения, 1 – для проверки).

Для гарантии монотонности модели дополнительно применялись два приема. Во-первых, в функцию потерь добавлялась малым коэффициентом регуляризирующая составляющая, штрафующая за неправильный знак производной: например, вычислялся численно градиент $\partial R / [\partial I_L; \text{тип песка}]$ на наборе контрольных точек, и если он становился положительным (что противоречит физическому смыслу), в ошибку добавлялся пропорциональный положительной части градиента штраф. Аналогично контролировался знак $\partial R / [\partial I_L; \text{тип песка}]$ (не должен быть отрицательным) и знак $\partial f / [\partial I_L; \text{тип песка}]$ (не должен быть положительным) [13,14].

Архитектура сетей была реализована с помощью библиотеки TensorFlow. Количество параметров модели для R составило 4 (веса входного слоя) \times 8 (нейронов скрытого слоя) + 8 (веса выхода) + 1 (смещение выхода) = 33 параметра, а для f – аналогично. Небольшое число обучаемых параметров обусловлено простотой зависимости и позволило избежать переобучения. Обе сети обучались очень быстро (сотни эпох заняли менее 1 секунды). Контроль качества осуществлялся на основе метрик R^2 (коэффициент детерминации), MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка) и критерия Дарбина–Уотсона (DW) для проверки автокорреляции ошибок.

Обучение моделей и валидация. Обучение нейросетевых моделей R и f проводилось на сформированной выборке, объединяющей нормативно-синтетические данные и (при наличии) реальные данные испытаний. Важным этапом было разделение выборки на обучающую и тестовую подвыборки. При этом соблюдался принцип стратификации по типам грунтов: данные по глинистым грунтам и пескам, а также по различным диапазонам параметров, распределялись примерно равномерно между обучением и тестом, это гарантировало, что модель проверяется на всех сценариях, а не только на преобла-



дающих (например, чтобы не вышло, что в тест попали лишь глинистые грунты, а обучение видело в основном пески, или наоборот). Размер тестовой выборки взят порядка 20% от всех данных. Кроме того, использовалась процедура кросс-валидации: модель переобучалась несколько раз на разных разбиениях данных (5-кратная перекрёстная проверка), и результаты усреднялись. Это служило дополнительной защитой от случайных артефактов разделения и позволяло настроить гиперпараметры (например, коэффициенты регуляризации, количество нейронов) по валидационной части, не затрагивая итоговую тестовую оценку.

В качестве функции потерь для обучения рассматривались два варианта: MSE (MeanSquaredError) – среднеквадратичная ошибка и Huberloss – сглаженная модульная ошибка. MSE является стандартным выбором для регрессионных задач и метода наименьших квадратов, однако она чувствительна к выбросам: несколько точек с большой ошибкой могут существенно повлиять на всю функцию потерь, заставляя модель уделять непропорционально большое внимание этим точкам. В нашем случае синтетическая выборка достаточно ровная, но возможны реальные экспериментальные точки, отстоящие от общей зависимости (например, сваи, имевшие аномальное заглубление). Huberloss сочетает преимущества MSE и MAE: при небольших отклонениях ведет себя как MSE, а при больших – линейно, уменьшая влияние выбросов. Проведя несколько пробных обучений и выявили, что Huberloss стабилизирует обучение, предотвращая чрезмерное «натягивание» кривых на отдельные аномальные точки, тогда как MSE иногда приводила к чуть большей волатильности модели на краях диапазонов. Поэтому окончательно в модели была принята функция потерь вида.

$$L = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N L_{\delta}(y_j - \hat{y}_j) + \beta \| \mathbf{w} \|^2 + \alpha L_{\text{мон}} \quad (1)$$

$$L_{\delta}(y_j - \hat{y}_j) = \begin{cases} (y_j - \hat{y}_j)^2 / 2 & , |y_j - \hat{y}_j| \leq \delta \\ \delta(|y_j - \hat{y}_j| - 0,5\delta) & , |y_j - \hat{y}_j| > \delta \end{cases} \quad (2)$$

где L – Huber loss с параметром перехода δ (выбран $\delta \approx 1$ в нормированных единицах целевой переменной), y_j – истинное значение (R или f) для примера j , \hat{y}_j – предсказанное сетью, β – коэффициент L2-регуляризации весов, α – коэффициент монотонной регуляризации, $L_{\text{мон}}$ – штраф за нарушения монотонности. Для сравнения также обучались сети с чистой MSE ($\delta \rightarrow 0$), и они показали близкие результаты по точности, однако финальный выбор пал на Huberloss, так как на проверочной выборке он дал несколько меньший максимальный ошибку (MAE) и более гладкие прогнозные зависимости.

Обучение проводилось итерационным градиентным методом. Поскольку размер сети сравнительно невелик (порядка сотен параметров), был за-

действован алгоритм Левенберга–Марквардта (LM), реализованный через пакетный режим обновления весов. Алгоритм LM сочетает методы градиентного спуска и Ньютона, эффективно используя приближение гауссиана функции ошибки [10]. Его преимущество – очень быстрая сходимость на задачах малой и средней размерности. Согласно литературным рекомендациям, для сетей с числом параметров порядка нескольких сотен Левенберг–Марквардт является одним из лучших вариантов по скорости и точности сходимости. В нашей задаче LM действительно показал высокую скорость: типично модель R сходилась за ~50–100 итераций до стационарного состояния (с уменьшением градиента на 4–5 порядков), а модель f – за ~150 итераций. Для сравнения, классический стохастический градиентный спуск (SGD) при тех же условиях требовал на порядок больше эпох и тщательного подбора скорости обучения, а адаптивные методы типа Adam не давали значимых преимуществ на таком небольшом датасете. Поэтому преимущество LM, несмотря на большие требования к памяти для хранения якобиана, оказалось решающим. Обучение каждой модели проводилось до сходимости ошибки (критерий – изменение ошибки меньше 10^{-6} либо достижение заданного максимума эпох, который не потребовалось задействовать).

7. Результаты и точность моделей. После обучения нейросетевые аппроксимации были протестированы на независимых данных и сравнены с исходными нормативными значениями. Точность прогноза оказалась весьма высокой: средняя ошибка не превышает нескольких процентов (таблица 1). В частности, средняя абсолютная процентная ошибка (MAPE) составляет порядка 2%, среднеквадратичная ошибка (RMSE) – около 55 кПа по R (что менее 2% от среднего уровня R), средняя абсолютная ошибка (MAE) ~37–0.4 кПа. Коэффициент детерминации R^2 близок к 0.999 для обеих функций, а корреляция между предсказанными и табличными значениями превышает 0.99 (рис. 4). Практически все точки лежат на линии 45° на графике «прогноз vs факт». Это подтверждается критерием Дарбина–Уотсона ($DW \approx 2.0$), который указывает на отсутствие автокорреляции в остатках. Распределение ошибок близко к нормальному (рис. 5): на Q-Q-графике точки лежат примерно на прямой (рис. 6), небольшие отклонения наблюдаются только на самых «хвостах» (что ожидаемо, так как ошибки ограничены по величине физическим смыслом и не имеют дальних выбросов).

Таблица 1 – Метрики точности нейронной модели R и f

	R^2	RMSE	MAE	MedAE	MAPE	Pearson Corr	Durbin-Watson
$R(I_L, h)$	0.9997	55.0247	37.5753	23.9421	0.92%	0.9999	2.1221
$f(I_L, h)$	0.9994	0.5924	0.4582	0.3638	6.54%	0.9998	1.4634

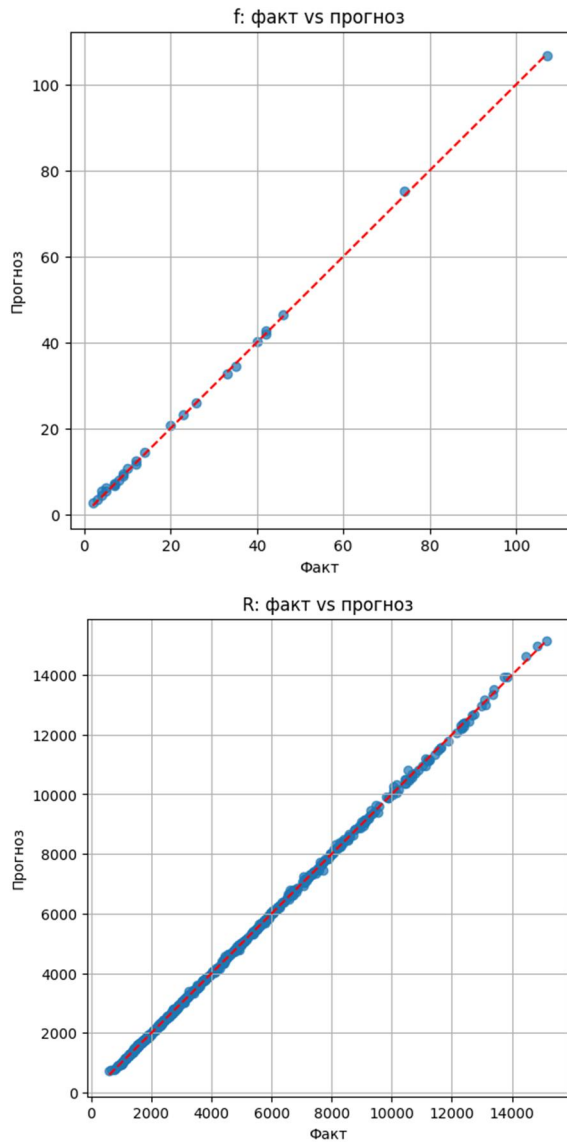


Рис. 4. Прогнозируемые R и f для различных глубин погружения L; интерполяция по СП 24.13330.2021

Аналогичные показатели получены и для функции $f(H)$. Так, MAPE для бокового сопротивления также порядка 2–3%, $R^2 \approx 0.998–0.999$. Максимальные ошибки не превышают 5–7 кПа и наблюдаются лишь в областях, где таблица имела резкие перегибы (например, переход от наращивания f к плато у текучих глинистых грунтов). В этих случаях нейросеть немного сглаживает «излом», но остаётся в пределах допустимой погрешности ~5%. Визуально кривые $f(H)$, полученные моделью, неотличимы от интерполированных нормативных (см. рис. 6). Таким образом, нейросеть фактически выполняет роль плавного интерполянта, воспроизводя СП с инженерной точностью (погрешность не превышает погрешностей самих нормативов и округлений).

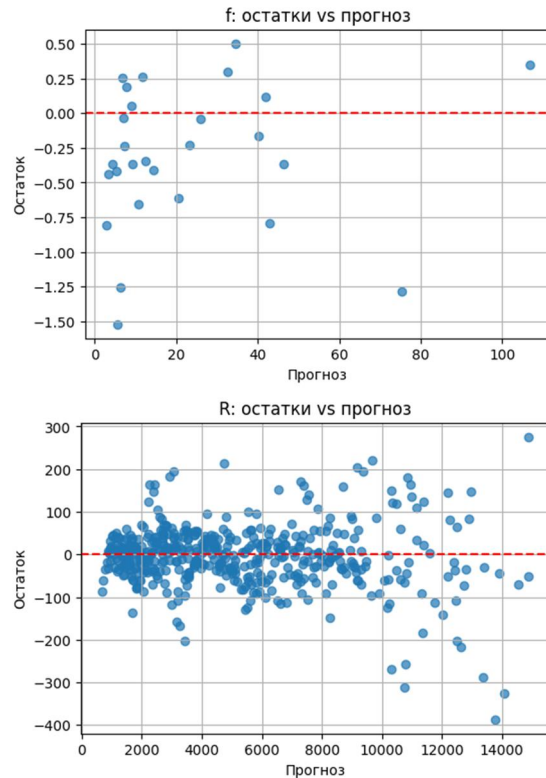


Рис. 5. Остатки модели R и f в координатах «прогноз vs остаток»

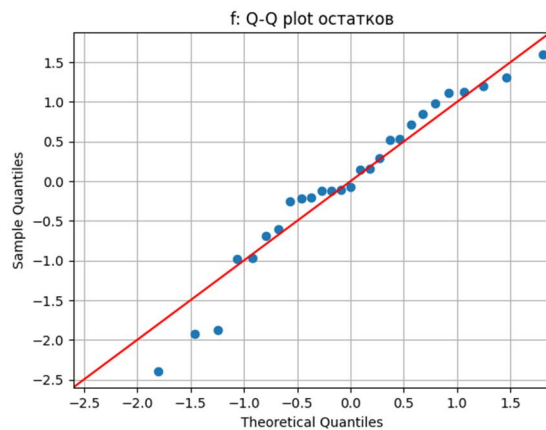
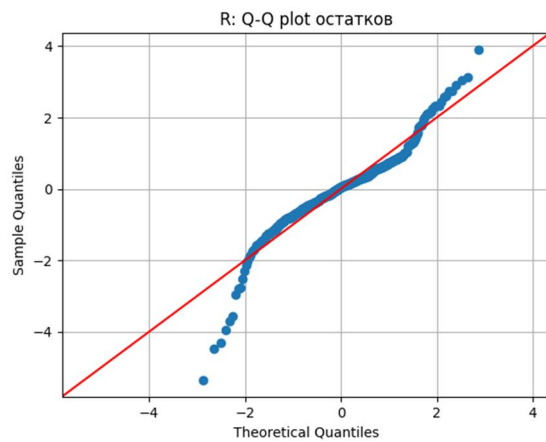


Рис. 6. График квантильных (quantile–quantile) остатков модели R и f



Важно подчеркнуть, что при такой точности модель сохраняет физическую адекватность вне точек обучения. Например, попытка экстраполировать R на I_L чуть больше 0.6 (чего не было в данных для R) приводит к разумному результату – модель прогнозирует дальнейшее снижение R , выходя на асимптотическое малое значение при $I_L \rightarrow 1$. Что согласуется с ожиданиями: текучий глинистый грунт практически не несёт нагрузку. Тем не менее, подобные экстраполяции за пределы обученной области желательно делать с осторожностью и пониманием физических пределов.

Полученные статистические метрики подтверждают пригодность разработанных нейросетевых моделей для расчётных целей. Они демонстрируют как высокую точность аппроксимации нормативных данных, так и стабильность (низкий разброс ошибок, отсутствие заметного смещения). Протестировано также было поведение моделей на реальных комбинациях параметров из проектных задач – везде, где можно свериться с таблицами СП, сеть даёт совпадающий результат. Таким образом, можно заключить, что цель – построить surrogate-модель, эмулирующую нормы – достигнута.

8. Ограничения и область применения модели.

При всех преимуществах предложенного подхода, необходимо четко обозначить пределы его применимости и заложенные допущения:

- *Типы грунтов.* Модели охватывают минеральные дисперсные грунты – пески разной крупности, супеси, суглинки, глины. Не рассматривались особые грунты (торфы, заторфованные, набухающие, просадочные и пр.). Таким образом, применять модель следует только для нескальных грунтов, классифицируемых по ГОСТ 25100. [16].

- *Слабое основание.* Как уже отмечалось, СП 24.13330.2021 не рекомендует опирание свай на рыхлые пески или глинистые грунты с $I_L > 0,6$. В модели эти области либо отсутствуют, либо намеренно помечены как недопустимые. Поэтому не следует экстраполировать предсказания нейросети на случаи, где свая опирается на рыхлый песок или текучепластичный и текучий глинистый грунт. Модель в лучшем случае выдаст сильно заниженное значение несущей способности (стремясь к нулю), но фактически в таких грунтах требуется либо искусственное основание, либо прорезка этих грунтов до более прочного слоя.

- *Диапазоны параметров.* Модель обучена в определенных пределах переменных: глубины до ~20 м, I_L до 0,6. Выход за эти диапазоны является экстраполяцией, и её результаты стоит трактовать осторожно. К примеру, прогноз R на глубине 30 м может быть неточным из-за отсутствия обучающих точек (хотя модель и знает об ограничении 20 МПа и, вероятно, не превысит его). Если возникает необ-

ходимость расчета для параметров вне обученного диапазона, желательно либо провести дополнительное обучение, включив синтетические данные для этих областей, либо проверить результат по прямым нормативным расчетам.

9. Выводы. По результатам выполненного исследования разработан и обоснован нормативно-ориентированный подход к формированию обучающих данных и построению нейросетевых аппроксиматоров, определяющих расчётное сопротивление грунта под нижним концом сваи (R) и на боковой поверхности (f_i) в соответствии с требованиями СП 24.13330.2021 [2] и классификацией грунтов по ГОСТ 25100–2020 [52]. Принципиальным достоинством предложенной методики является то, что, сохраняя исходную нормативную постановку расчёта несущей способности сваи, она переводит дискретный табличный аппарат в непрерывную «машиночитаемую» форму, обеспечивая тем самым ускорение расчётов и повышение технологичности последующих этапов оптимизации и обратного подбора параметров свай.

Показано, что для глинистых грунтов корректная параметризация по показателю текучести (I_L) и глубине, а для песчаных грунтов – по гранулометрическому составу, позволяет сформировать единый по методике контур генерации синтетических данных. При этом полученные нейросетевые модели демонстрируют высокую сходимость и стабильность аппроксимации нормативных зависимостей: дисперсия табличных значений практически полностью объясняется моделью, а ошибки предсказания находятся в диапазоне, допускаемом для инженерных расчётов. Высокая согласованность между нормативными значениями и прогнозами нейросети подтверждает корректность выбранных входных признаков, процедуры интерполяции и настроек обучения.

Ключевым итогом данной работы является обоснование того, что предложенный подход обеспечивает возможность масштабируемого формирования больших синтетических массивов данных как для глинистых, так и для песчаных грунтов. Именно высокая сходимость аппроксимации и нормативная непротиворечивость синтетики позволяют рассматривать сформированную выборку не только как средство обучения текущих компактных моделей (R) и (f_i), но и как фундаментальную основу для последующего расширения исследований:

- для обучения более сложных нейросетевых архитектур (включая ансамблевые и глубокие модели);

- для перехода к многомерным постановкам, учитывающим дополнительные факторы (геометрия сечения сваи, способ погружения, изготовления, многослойные разрезы, технологические ограничения);



- для построения гибридных контуров «нормативы + натурные данные + численные эксперименты», где нормативная синтетика играет роль устойчивого базиса, обеспечивая физическую и нормативную корректность обучения.

Таким образом, выполненная работа демонстрирует, что нормативно-согласованная генерация синтетических данных и их нейросетевая аппроксимация формируют методологически строгую и практически применимую основу для дальнейшего развития интеллектуальных систем в геотехнике, в том числе и для решения обратных задач - например подбора параметров свай по требуемой несущей способности.

Библиографический список

1. Li S., Hai M., Zhang Q., Zhou B., Wang M., Zhao Z. Study on an interpretable prediction model for pile bearing capacity based on SHAP and BP neural networks // *Scientific Reports*. — 2025. — Vol. 15. — Art. 28134. — DOI: 10.1038/s41598-025-13616-w

2. Свод правил СП 24.13330.2021. Свайные фундаменты. — М.: Российский институт стандартизации, 2022. — 82 с.

3. Системы искусственного интеллекта в строительстве / В. Б. Гушина, С. К. Попова, С. А. Раков [и др.] // Регулирование земельно-имущественных отношений в России: правовое и геопространственное обеспечение, оценка недвижимости, экология, технологические решения. — 2024. — № 1. — С. 177-182. — DOI 10.33764/2687-041X-2024-1-177-182. — EDN TJAXLJ.

4. Gu W., Liao J., Cheng S. Bearing capacity prediction of the concrete pile using tuned ANFIS system // *Journal of Engineering and Applied Science*. — 2024. — Vol. 71, No. 1. — DOI: 10.1186/s44147-024-00369-y.

5. Офрихтер, Я. В. Балансировка обучающей выборки при обучении искусственных нейронных сетей для решения геотехнических задач / Я. В. Офрихтер, А. Б. Пономарев // *Construction and Geotechnics*. — 2023. — Т. 14, № 2. — С. 144-153. — DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.11. — EDN DYTGEV

6. Офрихтер, Я. В. Оценка модуля деформации грунта по данным статического зондирования методами машинного обучения / Я. В. Офрихтер, А. Б. Пономарев // *Основания, фундаменты и механика грунтов*. — 2025. — № 1. — С. 22-28. — EDN VURUJ.

7. Офрихтер, Я. В. Прогноз работы одиночной забивной сваи в глинистых грунтах на основе расчетной модели: автореферат дис. ... кандидата технических наук: 2.1.2. / Офрихтер Ян Вадимович; [Место защиты: «Нацио-

нальный исследовательский Московский государственный строительный университет»; Диссовет 24.2.339.05 (Д 212.138.14)]. — Ярославское ш., 2025.

8. Болдырев Г.Г. К вопросу использования информационных систем при изысканиях и проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений [Электронный ресурс] // *Геотехника и геотехнический мониторинг*. — 2020. — URL: <https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/k-voprosu-ispolzovaniya-informacionnyh-sistem-pri-izyskaniyah-i-proektirovanii-osnovanij-fundamentov-zdaniij-i-sooruzhenij-42530.shtml> (дата обращения: 10.01.2023).

9. Об основных итогах восьмого Международного симпозиума «Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений» / В. И. Травуш, П. А. Акимов, А. М. Белостоцкий [и др.] // *Эксперт: теория и практика*. — 2023. — № 3(22). — С. 27-39. — DOI 10.51608/26867818_2023_3_27. — EDN FRBVKH.

10. Кашеварова, Г. Г. Искусственный интеллект, или "логические рассуждения и разумные решения" в технической диагностике объектов строительства / Г. Г. Кашеварова // *Academia. Архитектура и строительство*. — 2023. — № 4. — С. 166-180. — DOI 10.22337/2077-9038-2023-4-166-180. — EDN SYDNNW.

11. Мирный, А. Ю. Математические модели грунтов для инженеров / А. Ю. Мирный, А. С. Мосина. — Москва: ГеоИнфо (ИП Ананко В. Н.), 2024. — 414 с. — ISBN 978-5-605-17592-6. — EDN VXLJLJ.

12. Леденёв В.В., Монастырёв П.В., Куликов Г.М., Плотникова С.В. Расчётные модели для проектирования конструкций зданий. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2016. 296 с.

13. Соловьев, В. Н. Численные алгоритмы решения плохо обусловленных задач в условиях стохастической неопределенности / В. Н. Соловьев // *Системный анализ в науке и образовании*. — 2010. — № 3. — С. 74-82. — EDN MUTNFZ.

14. Перельмутер, А. В. Обратные задачи строительной механики / А. В. Перельмутер // *Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета*. — 2020. — Т. 22, № 4. — С. 83-101. — DOI 10.31675/1607-1859-2020-22-4-83-101. — EDN FWMJUD.

15. Прогнозирование несущей способности забивных свай на основе нейронных сетей / А. Н. Николюкин, В. М. Антонов, П. В. Монастырев [и др.] // *Эксперт: теория и практика*. — 2025. — № 4(31). — С. 86-97. — DOI 10.51608/26867818_2025_4_86. — EDN JXHCIE.

16. Евдокимов А. Г. Расчёт свайных фундаментов мостовых опор при образовании карстовых деформаций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 2.1.2 / А. Г. Евдокимов; ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ (МИИТ)). — М., 2024. — 24 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 21.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 21.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 69.04

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения

doi:10.51608/26867818_2026_2_124

МЕХАНИЗМЫ ДЕГРАДАЦИИ И РАСЧЕТНЫЕ МОДЕЛИ СЦЕПЛЕНИЯ КОРРОДИРОВАННОЙ АРМАТУРЫ С БЕТОНОМ

© Авторы, 2026

SPIN: 2996-1425

НИКОЛЮКИН Алексей Николаевич

к.т.н., ст. преподаватель кафедры «Конструкции зданий и сооружений»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: valax1@yandex.ru)

SPIN: 9902-5620

ХУДЯКОВ Александр Владимирович

к.т.н.
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов)

SPIN: 8674-6046

МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович

член-корреспондент РААСН, доктор технических наук,
директор института Архитектуры, строительства и транспорта
Тамбовский государственный технический университет; РААСН
(Россия, Тамбов, e-mail: monastyrrev68@mail.ru)

МАМОНТОВ Андрей Александрович

аспирант
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов)

БУЛАНОВА Виктория Александровна

студент
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов)

Аннотация. В статье рассматриваются существующие подходы к описанию сцепления арматуры с бетоном при развитии коррозионных повреждений в железобетонных конструкциях. Проанализированы классические и современные модели сцепления. Особое внимание уделено влиянию коррозии на механизм передачи усилий между арматурой и бетоном, поскольку образование продуктов коррозии приводит к разрушению около арматурной области в бетоне, ухудшению работы поперечных ребер арматуры. Показано, что наиболее информативным показателем остаточного сцепления является ширина коррозионных трещин, поскольку она лучше отражает фактическое повреждение зоны контакта арматуры с бетоном. Установлено, что существующие модели дают существенно различающиеся количественные оценки, однако сходятся в описании общей закономерности: при малой коррозии возможно кратковременное увеличение сцепления, после появления трещин происходит резкое снижение прочности.

Ключевые слова: коррозия арматуры; сцепление арматуры с бетоном; железобетонные конструкции; коррозионные трещины; анкеровка арматуры; деградация сцепления

Для цитирования: Механизмы деградации и расчетные модели сцепления корродированной арматуры с бетоном / А.Н. Николюкин, А.В. Худяков, П.В. Монастырев, А.А. Мамонтов, В.А. Буланова // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 124-131. doi:10.51608/26867818_2026_2_124.



Original article

MECHANISMS OF DEGRADATION AND CALCULATION MODELS
FOR THE BOND BETWEEN CORRODED REINFORCEMENT AND CONCRETE

© Autors, 2026

NIKOLYUKIN Alexey Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)

KHUDYAKOV Alexander Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)

MONASTYREV Pavel Vladislavovich

Corresponding Member of the RAASN, doctor of technical sciences,
Director of the Institute of Architecture, Construction and Transport
Tambov State Technical University; RAACS
(Russia, Tambov, e-mail: monastyrev68@mail.ru)

MAMONTOV Andrey Aleksandrovich

PhD Candidate
Tambov State Technical University; RAACS
(Russia, Tambov)

BULANOVA Victoria Alexandrovna

student
Tambov State Technical University; RAACS
(Russia, Tambov)

Abstract. The article examines existing approaches to describing the bond between reinforcement and concrete under the development of corrosion damage in reinforced concrete structures. Classical and modern bond models are analyzed. Special attention is paid to the effect of corrosion on the mechanism of load transfer between reinforcement and concrete, since the formation of corrosion products leads to the destruction of the near-reinforcement area in the concrete and impairs the performance of the transverse ribs of the reinforcement. It is shown that the most informative indicator of residual bond is the width of corrosion cracks, as it better reflects the actual damage to the contact zone between reinforcement and concrete. It has been established that existing models yield significantly different quantitative estimates but agree in describing the general trend: with low corrosion, a short-term increase in bond may be possible, but after the appearance of cracks, a sharp decrease in strength occurs.

Keywords: reinforcement corrosion; bond between reinforcement and concrete; reinforced concrete structures; corrosion cracks; reinforcement anchorage; bond degradation

For citation: Mechanisms of degradation and calculation models for the bond between corroded reinforcement and concrete / A.N. Nikolyyukin, A.V. Khudyakov, P.V. Monastyrev, A.A. Mamontov, V.A. Bulanova // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 124-131. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_124.

1. Введение. Надежность и долговечность железобетонных конструкций в значительной степени определяются сохранением совместной работы арматуры и бетона на протяжении всего расчетного срока эксплуатации. Одним из ключевых условий такой совместной работы является сцепление арматурного стержня с бетонной матрицей, обеспечивающее передачу продольных усилий, анкеровку стержней, работу нахлесточных соединений и пере-

распределение напряжений в трещинообразующих зонах. При этом сцепление представляет собой не только адгезионное взаимодействие на поверхности контакта, но и сложный механический процесс, включающий трение, механическому зацеплению периодического профиля арматуры, сопротивление бетона радиальному распору и влияние поперечного армирования. Именно поэтому нарушение сцепления арматуры с бетоном следует рассматри-



вать, как один из наиболее опасных механизмов снижения несущей способности железобетонных элементов [1-19].

В условиях длительной эксплуатации железобетонные конструкции подвергаются воздействию агрессивных факторов внешней среды, среди которых особое место занимает коррозия арматуры. Карбонизация бетона, проникновение хлоридов, периодическое увлажнение, перепады температуры и снижение щелочности поровой жидкости приводят к развитию коррозионных процессов. Продукты коррозии имеют больший объем по сравнению с исходным металлом, вследствие чего около арматурной области бетона возникают радиальные растягивающие напряжения. Их накопление вызывает образование продольных трещин вдоль арматуры, отслоение защитного слоя и нарушение структуры контактной зоны «арматура — бетон». В результате снижается не только площадь поперечного сечения стержня, но и способность арматуры передавать усилия на бетон через сцепление.

изменяется: полноценная адгезионно-фрикционная и механическая связь заменяется остаточным трением и частичным зацеплением, что приводит к существенному снижению надежности элемента.

Существующие расчетные модели сцепления, включая классические представления Прандтля, модель Рема, диаграммы СЕВ-FIP, а также подходы АСI и Еврокода, СП в основном ориентированы на описание работы неповрежденного железобетона. Они позволяют оценивать прочность сцепления, длину анкеровки и условия передачи усилий при нормативном состоянии бетона и арматуры. Однако при коррозионном повреждении исходные предпосылки этих моделей существенно нарушаются: изменяется геометрия поверхности стержня, повреждаются поперечные ребра, снижается прочность бетона в приарматурной зоне, появляются продольные трещины и уменьшается величину сцепления. Поэтому применение традиционных расчетных зависимостей без учета коррозионной деградации может приводить к завышенной оценке остаточной несущей

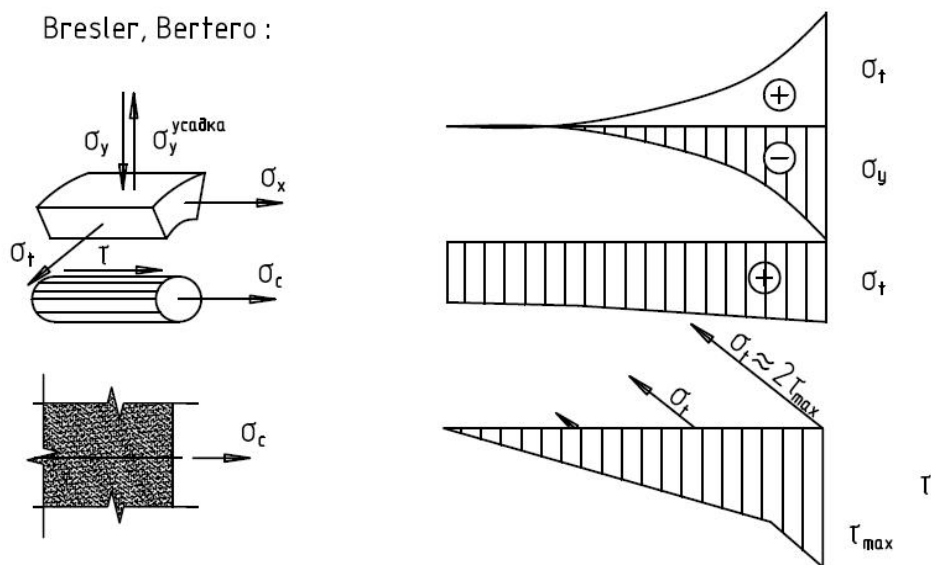


Рис. 1. Распределение напряжений в контактном слое арматуры с бетоном [19]

Особенность коррозионного повреждения состоит в том, что потеря сцепления может наступать значительно раньше, чем исчерпание прочности самой арматуры. Даже сравнительно небольшая степень коррозии способна вызвать раскрытие трещин в защитном слое, ослабление бетона в зоне поперечных ребер и резкое снижение анкерочной способности. На начальной стадии продукты коррозии могут создавать дополнительное обжатие арматуры и временно повышать сопротивление выдергиванию, однако данный эффект является нестабильным. После образования коррозионных трещин механизм взаимодействия арматуры с бетоном качественно

изменяется [1-10].

В связи с этим особую актуальность приобретает анализ моделей, учитывающих влияние коррозии на сцепление арматуры с бетоном. К числу наиболее значимых факторов относятся степень потери сечения арматуры, ширина коррозионных трещин, толщина защитного слоя, диаметр стержня, класс бетона, характер коррозионного поражения, наличие поперечной арматуры и условия агрессивного воздействия. При этом ширина продольной трещины является одним из наиболее информативных параметров, поскольку она может быть определена при обследовании конструкции и непосред-

ственно отражает степень нарушения контактной зоны. В отличие от скрытой потери металла, требующей вскрытия бетона или применения специальных методов диагностики, трещинообразование позволяет судить о фактическом состоянии сцепления более наглядно и практически применимо.

Целью настоящей работы является анализ существующих расчетных и экспериментально-эмпирических моделей сцепления корродированной арматуры с бетоном, выявление основных закономерностей деградации сцепления и оценка факторов, определяющих остаточную прочность контактного взаимодействия. Рассмотрение данной проблемы имеет важное значение для расчета остаточного ресурса железобетонных конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах, а также для разработки более обоснованных методов обследования, усиления и прогнозирования долговечности поврежденных элементов.

2. Анализ существующих моделей сцепления корродированной арматуры с бетоном. Исторически расчет сцепления базировался на моделях, заимствованных из теории трения и поверхностного сдвига. Диаграмма Прандтля – одна из первых идеализированных моделей распределения напряжений сцепления вдоль анкеровки (рисунок 2а). Она пред-

даци сцепления после максимума – особенно актуальной при коррозии.

Большой вклад в теорию сцепления внесли работы **Г. Рема** (Rehm) и соавторов (1970-е гг.) (рисунок 2). Рем одним из первых подробно исследовал работу **рифленной арматуры** и показал, что решающее значение имеют механические анкеры – поперечные ребра, врезающиеся в бетон [10]. Он предложил разделять сопротивление сцеплению на компонент адгезионно-фрикционный и компонент упора рёбер. Согласно его модели, после срыва адгезии сцепление обеспечивается чередованием циклов: рёбра дробят или отталкивают бетон (вызывая микроскольжение), затем за счет упругого ответа бетон снова прижимается к стержню – что обуславливает характерную пилообразную диаграмму τ - g . Формулы Рема легли в основу многих национальных норм, в том числе германских нормативных документов. На их базе позже были разработаны эмпирические зависимости для определения максимального напряжения сцепления τ_{max} через прочность бетона и относительную площадь рёбер арматуры. Данные к зависимости актуальны для неповреждённого бетона. При коррозии же предпосылки модели Рема нарушаются: бетон в зоне рёбер ослаблен трещинами, а сами рёбра могут частично разрушаться

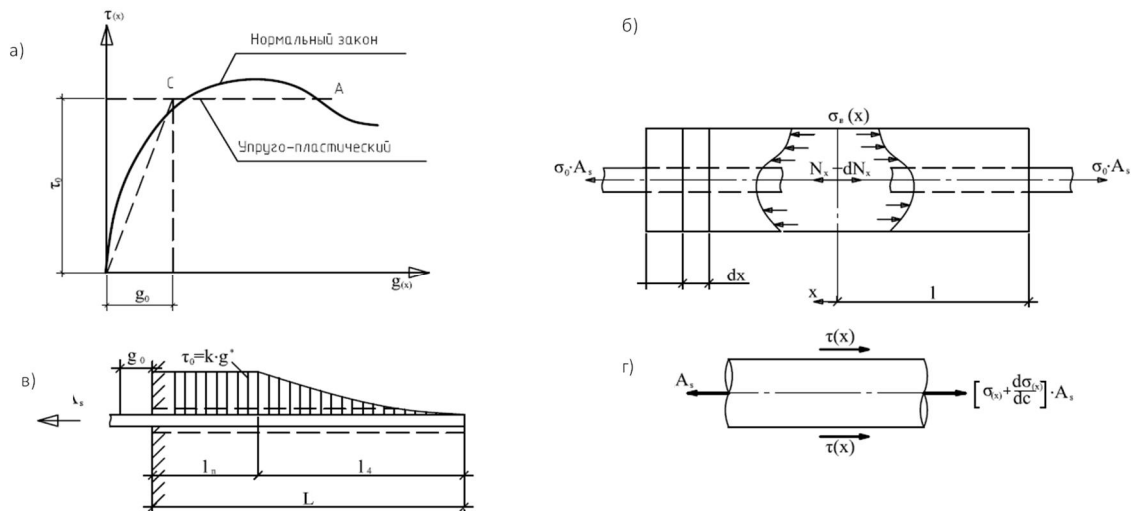


Рис. 2. Совместная работа арматурного стержня с бетоном: а) Диаграмма « τ – g »: упруго-пластический и нормальный закон сцепления; б) Распределение напряжений сцеплений по длине арматуры при упруго-пластическом законе; в) расчёт на сцепление, равновесие бетонного элемента; г) равновесие элемента стержня dx

полагает линейное нарастание касательных напряжений от конца стержня до некоторого максимума, после чего следует площадка пластического скольжения. В русской инженерной практике долгое время сопротивление сцеплению моделировалось по типу этой диаграммы, задавая для арматуры упрощенные двухлинейные зависимости (упругая ветвь до предела сцепления и горизонтальная пластическая ветвь) [16; 19]. Такая идеализация удобна для расчета вручную, но не отражает стадии дегра-

вследствие коррозии, поэтому расчетные значения τ_{max} требуют корректировки.

Модель CEB-FIP / fib Model Code. Международные модельные кодексы (CEB-FIP 1990, fib Model Code 2010) предлагают унифицированную **диаграмму “сцепление–скольжение”** для разных типов арматуры. Для рифленной арматуры она имеет крутой подъем до τ_{max} при малых скольжениях (до 0.6 мм), затем постепенное падение напряжения до некоторого остаточного уровня τ_{res} при больших проскаль-



званиях (порядка нескольких мм) [10]. Параметры диаграммы (величины τ_{max} , τ_{res} и характер кривой) зависят от конкретных условий: хорошее или плохое сцепление, наличие поперечного армирования и др. В Model Code 2010 приведены рекомендуемые значения: например, τ_{max} для хороших условий равен $2.5\sqrt{R_{bn}}$ (в МПа) при определенной базовой длине анкеровки. Данные модели охватывают лишь ненарушенное сцепление. Для учета коррозии fib в одном из бюллетеней предложил вводить **коэффициент деградации** в зависимости от ширины трещины: например, при трещине 0.1 мм – снижение τ_{max} на 10%, при 0.3 мм – на 50% и т.д. Однако в основном нормативные диаграммы остаются статичными.

Формулы ACI и Еврокода. В американских рекомендациях ACI Committee 408 приведены эмпирические формулы для **прочного сцепления (bond strength)**, выведенные из большой базы испытаний. Одна из них выражает максимальное напряжение сцепления τ_{max} (в МПа) как функцию прочности бетона R_b (МПа), относительной площади рёбер и степени обжатия (конфинемента) с коэффициентами, подогнанными по экспериментам. Еврокод, как упомянуто, вместо явного τ для проектной длины анкера, тем самым избегая необходимости явного расчета диаграммы сцепления. Лапсплайсы (перехлесты) рассчитываются аналогично анкеровке, с дополнительными поправками на одновременное анкерование группы стержней. Все эти подходы вводит расчетное напряжение f_{bd} **не учитывают повреждения от коррозии**. В них предполагается, что если конструкция соответствует требуемым минимальным параметрам (толщина слоя, класс бетона и т.д.), то запас сцепления достаточен на весь срок службы. Однако, как показали исследования, **даже незначительная коррозия может резко изменить картину** – вплоть до того, что фактическая несущая способность анкеровки оказывается в разы ниже нормативной [5]. Потому в проектах, где ожидается агрессивное воздействие, рекомендуется закладывать дополнительные меры: увеличение l_b , применение арматуры с защитными покрытиями, ингибиторы коррозии в бетон и т.п., хотя формально это не отражено прямыми коэффициентами в формулах.

Влияние основных факторов на сцепление арматуры с бетоном при коррозии pH среды и агрессивность воздействий: как отмечалось, щелочность бетона защищает сталь; потому скорость снижения сцепления тесно связана с химией среды. При **карбонизации** (падении pH до ~ 9) сцепление начинает ухудшаться после депассивации стали – обычно это происходит, когда фронт карбонизации достигает арматуры и появляется первая сетка мелких трещин. Далее равномерная коррозия быстро снижает сцепление на всей длине стержня. **Хлориды**, напротив, могут проникать к арматуре и вызывать питтинг даже

при локально ещё высоком pH ~ 12 , поэтому сцепление может оставаться близким к исходному до момента внезапного образования трещины от локального питтинга. Эксперименты показывают, что для возникновения трещины покрытия при малом защитном слое (отношение $\phi \approx 2-3$) достаточно $\sim 1\%$ коррозии (по массе), тогда как при толстом слое ($a/d > 5$) трещины могут не появляться до 4–5% потери массы [7]. Таким образом, степень развития коррозии, при которой начинается падение сцепления, зависит от **качества защитного слоя**.

Толщина защитного слоя (отношение защитного слоя бетона к диаметру арматуры a/d): Чем больше бетонное покрытие над арматурой, тем дольше сохраняется сцепление при коррозии. Толстый слой бетона распределяет растягивающее усилие от набухающей ржавчины на больший объем, задерживая образование сквозных трещин. В испытаниях Амаду Сакир Силл, Тосики Канакубо показано, что при $a/d \approx 3$ первые трещины от коррозии появлялись уже при $\sim 1\%$ ржавления, тогда как при $a/d \approx 7$ – лишь при $\sim 4\%$ [7]. После образования трещин, тем не менее, поведение образцов с разной толщиной слоя сходно, разница лишь в остаточном сцеплении: при большем c трещины раскрываются меньше, и часть сцепления удерживается даже при значительной коррозии [7]. Российские исследователи также отмечают, что **отношение a/d – один из ключевых факторов**: при более высоком отношении потеря прочности сцепления меньше, чем при низком. Поэтому для существующих конструкций с тонким защитным слоем коррозия арматуры особенно опасна в контексте анкеровки.

Степень потери сечения арматуры: С уменьшением эффективного диаметра стержня не только снижается его прочность, но и уменьшается площадь контакта с бетоном. Однако, как ни парадоксально, небольшая потеря сечения сама по себе (без учета трещин) не так критична для сцепления. Как упоминалось, 2%-ная потеря диаметра вызвала 80%-ное падение сцепления именно потому, что сопутствовала растрескиванию бетона и нарушению контакта [5]. Если же даже значительная коррозия протекает без трещин (скажем, *равномерное* поверхностное ржавление под плотным бетонным слоем), то сцепление может сохраняться на приемлемом уровне до разрушения рёбер. На практике же потеря сечения почти всегда сопряжена с растрескиванием бетона, поэтому **принято коррелировать снижение сцепления с массовой степенью коррозии (% массы)** либо с геометрической – глубиной пропитывания ржавчиной, определяемой снятием бетона. Формально, некоторые модели (например, модель Бааргавы) вводят коэффициент снижения сцепления η как функцию от доли утраченного сечения: $\eta = f(X)$, где X – относительная глубина коррозионного проникнове-



ния. Но из-за сложности точного измерения X в условиях эксплуатации более практичным показателем оказался **размер коррозионной трещины**.

Ширина коррозионных трещин: данные фактор наиболее наглядно отражает деградацию сцепления. Когда вокруг стержня образуется продольная трещина и выходит на поверхность, можно говорить, что сцепление практически потеряно на данном участке (работает только трение). Исследования в работах [1-5;12] показали, что остаточная прочность сцепления статистически лучше коррелирует с максимальной шириной коррозионной трещины a_{crc} , чем с процентом потерянной массы. Так, при $a_{crc} \approx 0.1$ мм снижение сцепления может быть порядка 10–20%, при $a_{crc} = 0.3$ мм – уже до 50%, а при $a_{crc} > 0.5$ мм сцепление стремится к нулю (выдерживается лишь за счет хомутов, если они есть). Преимущество показателя w_{cr} в том, что его можно измерить при обследовании конструкции неразрушающими методами (визуально или щупом), тогда как процент коррозии внутри бетона напрямую не измерить. Поэтому новые модели оценки используют w_{cr} как входную переменную: они предлагают формулы, связывающие относительную прочность сцепления τ/τ_0 с шириной трещины и параметрами арматуры/хомутов. Один из примеров: при наличии хомутов и нескольких стержней зависимость может быть логарифмической, вида $\tau/\tau_0 = 1 - A \ln(1 + a_{crc}/B)$ (где A, B – коэффициенты, зависящие от a/d и шага хомутов). Хотя точные параметры разнятся, общий вывод таков: **ширина трещины – надежный индикатор остаточного сцепления**, и ее учет крайне важен.

Поперечное обжатие (поперечная арматура): Наличие хомутов или напряженного обжимающего кольца вокруг стержня может значительно замедлить деградацию сцепления. Хомуты стягивают бетон, препятствуя раскрытию коррозионных трещин, и тем самым **сохраняют сцепление даже при поврежденном бетоне**. Эксперименты показывают, что при умеренной коррозии (~ 4% потери) в образцах с хомутами падение сцепления незначительно, тогда как без хомутов – заметно [7]. Более того, небольшая коррозия самих хомутов (<10% массы) иногда **повышает** сцепление главной арматуры, так как ржавые хомуты начинают расклинивать бетон изнутри, создавая дополнительное обжатие [7]. Лишь сильная коррозия хомутов (>15%) приводит к их перелому или потере напряжения, после чего сцепление резко падает. Таким образом, в элементах с хорошим поперечным армированием сцепление обладает большей "живучестью": даже потрескавшийся бетон продолжает передавать усилия через эффект обоймы. В отсутствие же сцепления (например, верхняя рабочая арматура в плитах без хомутов) коррозия быстро приводит к полной потере анкеровки.

Примеры зависимостей и модели деградации сцепления

За последние десятилетия предложен ряд эмпирических моделей, пытающихся количественно описать снижение сцепления при коррозии. Ниже приведены некоторые характерные результаты:

- Ауэнг, Й. и другие: проводили выдергивания арматуры, подвергнутой равномерной электрохимической коррозии. Установлено, что **критическое** снижение сцепления происходит уже при минимальной ржавчине: так, при потере сечения ~2% прочность сцепления упала на ~80% [5]. Авторы подчеркнули, что **сцепление более уязвимо к коррозии, чем прочность самого стержня**, и что первые же коррозионные трещины почти обнуляют адгезию и зацепление.

- Аль-Сулаими Дж. Дж. И др. авторы: Одни из пионерских экспериментов по сцеплению с разным защитным слоем. Выведена **критерий трещинообразования**: при отношении $a/d = 3.75$ трещины от коррозии появляются около 1% масс. потерь, при $a/d = 5.4$ – около 2%, при $a/d = 7.5$ – ~4% [7]. Соответственно, **диаграмма "масса коррозии – относительное сцепление"** имеет три стадии: небольшой рост τ до ~0,5–1% коррозии (за счет расклинивания), резкое падение τ на 50–60% при 1–4% коррозии, и плавное снижение к ~0 при дальнейшей коррозии [7]. Предложена простая формула: $\tau = \tau_0 \cdot \left(1 - \frac{X - X_{crc}}{X_{ult} - X_{crc}}\right)$ при $X_{crc} < X < X_{ult}$ (где X – процент коррозии, τ_0 – начальное сцепление, X_{crc} – процент коррозии к появлению первой трещины, X_{ult} – при полном исчезновении сцепления). Хотя она носит подгоночный характер, сама концепция трех стадий признана многими авторами [7].

- **Модель Бааргавы:** Предложена аналитическая модель на основе толстостенного цилиндра. Формулы учитывают радиальное давление ржавчины p_{cor} на бетон и связывают его с шириной трещины. Ключевой результат: остаточное сцепление пропорционально $e^{-\lambda a_{crc}}$ (экспоненциально падает с ростом трещины). Параметр λ зависит от модуля упругости бетона и геометрии, и его рекомендовали принимать из калибровки по эксперименту. Модель показывает, что **даже при нулевом сечении арматуры (теоретически) сцепление не пропадает полностью**, пока не растрескался бетон – т.е. пока $a_{crc} = 0$ есть сцепление чисто за счет контакта. Но практически a_{crc} всегда > 0 при любой значимой коррозии, поэтому формула сводится к быстрому убыванию.

- **Связь с шириной трещин:** Получены **линейные и логарифмические зависимости** между остаточным сцеплением τ/τ_0 и максимальной коррозионной трещиной w_{cr} . Например, Ло Д.В. предложили линейную модель: $\tau/\tau_0 = 1 - 1.3 \cdot (a_{crc}/a)$ для трещин $0 < a_{crc} < 0.5c$ (где a – толщ. слоя) [16]. Лин Х.



уточнили, что лучше использовать логарифм: $\tau/\tau_0 = a - b \ln(1 + a_{cr})$ (при определенных a, b для условий без хомутов), что давало согласование с их испытаниями эксцентричного выдергивания [16]. Оба подхода сходятся на том, что при $a_{cr} > 0.4$ мм $\tau/\tau_0 \rightarrow 0$, то есть практически сцепление утрачено. Данные модели удобны тем, что требуют легко измеряемого параметра (a_{cr}) и учитывают c . Их принял на вооружение fib: в **Model Code 2010** приведена упрощенная зависимость, графически показанная на рис. 3.

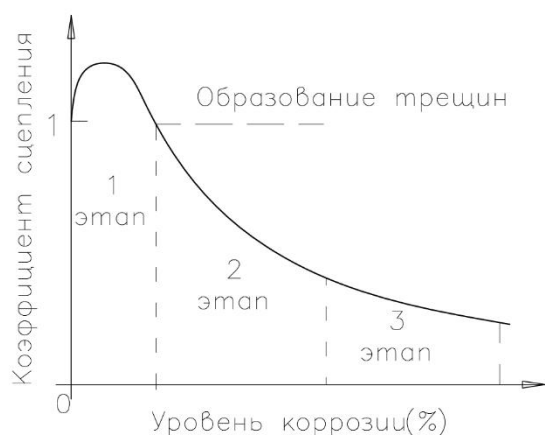


Рис. 3. Дegrадация прочности сцепления (отношение τ_{cor}/τ_0) в зависимости от степени коррозии арматуры по обобщенным литературным данным [7]

- На графике выделены три стадии: I – начальное повышение сцепления при малой коррозии; II – резкое снижение прочности сцепления после появления трещин; III – остаточное сцепление на высоких степенях коррозии (асимптотическое приближение к пределу).

- Работы Ялчинер Х: Отдельно изучаются влияния высокопрочного бетона, эпоксидной арматуры, анкерных клеев и пр. Так, [7] показали, что **высокопрочный бетон** (50 МПа) хоть и обеспечивает большее начальное сцепление, но при коррозии деградирует сильнее, чем обычный 20-МПа бетон: в твердых малопористых матрицах коррозия вызывает более резкие и крупные трещины, мгновенно обрушивая сцепление. Также отмечено, что **эпоксидное покрытие** защищает сталь от коррозии, но само по себе снижает начальное сцепление (~20%), поэтому в сильно агрессивных средах бывает палка о двух концах. Новые материалы – например, ультра-высокопрочный бетон (УНРС) – показывают лучшую стойкость сцепления: за счет плотной структуры УНРС долго противится проникновению коррозии, и ржавчина распространяется поверхностно, не вызывая крупных трещин [7; 9]. Однако если трещины всё же возникли, то из-за большей хрупкости УНРС потеря сцепления происходит почти скачкообразно [7].

В целом, анализ существующих формул и данных демонстрирует, что **общее поведение деградации сцепления качественно сходно** (рис. 3): небольшая коррозия – небольшой эффект, появление трещин – резкое ухудшение, далее плавное угасание до остаточного уровня. Но **количественные предсказания разных моделей сильно варьируются** [7]. Каждая модель хорошо описывает свой набор экспериментальных условий, но плохо экстраполируется на другие случаи. Одни используют в качестве главного параметра процент массовой потери, другие – ширину трещины, третьи – геометрию питтингов; одни учитывают хомуты явно, другие нет, что приводит к разбросу результатов моделирования (как видно из сравнительных графиков моделей между собой). Например, по одним моделям при 5% коррозии сцепление падает до 20% от исходного, а по другим – лишь до ~50%. Причины разброса – различие в методах испытаний, характере коррозии (равномерная или точечная), геометрии образцов и принятых упрощениях. Поэтому до сих пор **не выработано универсальной формулы**, принимаемой всеми исследователями. Тем не менее, наметились определенные тенденции и согласие в ключевых влияющих факторах, о которых говорилось выше (поперечное обжатие, a/d , a_{cr} и т.д.).

3. Основные выводы. 1. Анализ нормативных подходов выявил, что стандартные формулы анкеровки **не учитывают деградацию сцепления со временем**. Они направлены на предотвращение коррозии (через требования к трещиностойкости и защитному слою), но не дают явных коэффициентов на случай, если арматура уже поражена коррозией. Данное ограничение требует разработки новых нормативных рекомендаций. На основе современных исследований можно рекомендовать использовать **ширину коррозионных трещин как ключевой показатель** при оценке остаточной анкеровки. Например, при обследовании если вдоль стержня обнаружены продольные трещины шириной >0.3 мм, в расчетах следует предполагать существенную потерю сцепления (до полной) на данном участке и принимать меры усиления.

2. Обобщая литературные модели, можно дать следующие рекомендации для расчета сцепления при коррозии: (а) учитывать стадию коррозии – до или после образования трещин (до трещин можно считать сохранение до 80–100% сцепления, после трещин – резкое снижение); (б) использовать понижающие коэффициенты к прочности сцепления в зависимости от a/d и наличия хомутов (для малых a/d снижение сильнее); (в) при оценке по потерям сечения применять модели типа $\tau/\tau_0 = f(X)$ с осторожностью и подтверждать их измерением трещин; (г) предпочтительно применять модели на основе **коррозионных трещин**: например, скорректирован-



ную диаграмму сцепления, где максимальное напряжение τ_{max} является функцией a_{crc} , а остаточное сцепление принимается нулевым при a_{crc} превышающем критическое (например 0.5 мм)..

3. Направления дальнейших исследований включают: согласование результатов между разными авторами (создание обширной общей базы испытаний сцепления при коррозии), учет реологических факторов (например, длительное влияние коррозии под нагрузкой), а также разработку **унифицированной модели деградации сцепления**, пригодной для внедрения в нормы. Также перспективно изучение сцепления **арматуры эксплуатируемых конструкций** при коррозии – предварительные данные указывают, что относительное снижение сцепления у гладкой арматуры может быть иным, чем у периодической.

В заключение, снижение сцепления арматуры с бетоном при коррозии – многогранная проблема, влияющая на надежность железобетона. Современные исследования выявили ключевые факторы и закономерности деградации сцепления, однако разброс данных пока мешает формулировке единой теории. Практическим инженерам рекомендуется закладывать повышенный запас анкерровки в агрессивных средах и регулярно инспектировать конструкции на предмет коррозионных повреждений. Развитие же научных моделей сцепления при коррозии продолжится, объединяя эксперименты, численные методы и разработки аналитических моделей с применением искусственных нейронных сетей, что в перспективе найдет отражение в нормативных документах для обеспечения безопасности и долговечности зданий и сооружений в будущем.

Библиографический список

1. Auyeung Y., Balaguru P., Chung L. Bond behavior of corroded reinforcement bars // *ACI Materials Journal*. 2000. Vol. 97, No. 2. P. 214–220.
2. Li C.Q., Zheng J.J. Propagation of reinforcement corrosion in concrete and its effects on structural deterioration // *Magazine of Concrete Research*. 2005. Vol. 57, No. 5. P. 261–271.
3. Lundgren K. Effect of corrosion on the bond between steel and concrete: an overview // *Magazine of Concrete Research*. 2007. Vol. 59, No. 6. P. 447–461.
4. Mancini G., Tondolo F. Effect of bond degradation due to corrosion — a literature survey // *Structural Concrete*. 2014. Vol. 15, No. 4. P. 408–418.
5. Lin H., Zhao Y., Ozbolt J., Hans-Wolf R., Huang R. State-of-the-art review on the bond properties of corroded reinforcing steel bar // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 213. P. 216–233.

6. Тамразян А.Г., Лушников В.Ю. Влияние коррозии арматуры на сцепление между арматурой и бетоном // *Инженерно-строительный журнал*. 2018. № 4(80). С. 128–137. DOI: 10.18720/MCE.80.12.

7. Syll A.S., Kanakubo T. Impact of Corrosion on the Bond Strength between Concrete and Rebar: A Systematic Review // *Materials*. 2022. Vol. 15, No. 19. Art. 7016. DOI: 10.3390/ma15197016.

8. Hosseinzadeh Kashani A., Ghalehnovi M., Etemadfar H. ML modeling of ultimate and relative bond strength for corroded rebars based on concrete and steel properties // *Scientific Reports*. 2025. Vol. 15. Art. 26830. DOI: 10.1038/s41598-025-09532-8.

9. Минеев М.С. Исследование параметров сцепления арматуры в бетоне для его оценки при коррозии // *Инженерный вестник Дона*. 2024. № 2. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n2y2024/8988> (дата обращения: 12.03.2026).

10. Tang C.-W., Cheng C.-K. Modeling Local Bond Stress–Slip Relationships of Reinforcing Bars Embedded in Concrete with Different Strengths // *Materials*. 2020. Vol. 13, No. 17. Art. 3701. DOI: 10.3390/ma13173701.

11. Шильченок В.В. Карбонизация бетона // *Белорусский национальный технический университет*. 2020. С. 239–240. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/85749/239-240.pdf> (дата обращения: 12.03.2026).

12. Zhao Y., Xu X., Wang Y., Dong J. Characteristics of pitting corrosion in an existing reinforced concrete beam exposed to marine environment // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 234. Art. 117392. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117392.

13. EN 1992-1-1:2004+A1:2014. Eurocode 2: Design of concrete structures — Part 1-1: General rules and rules for buildings.

14. СП 28.13330.2017. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85.

15. ГОСТ 31384-2017. Защита бетонных и железобетонных конструкций от коррозии. Общие технические требования.

16. Koulouris K.I., Apostolopoulos C.A., Kytinou V.K. Study of the Residual Bond Strength between Corroded Steel Bars and Concrete—A Comparison with the Recommendations of Fib Model Code 2010 // *Metals*. 2021. Vol. 11, No. 5. Art. 757. DOI: 10.3390/met11050757.

17. Римшин В.И., Сулейманова Л.А., Амелин П.А., Крючков А.А. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, имеющих повреждения арматуры вследствие контакта с хлоридной агрессивной средой // *Эксперт: теория и практика*. 2023. № 3(22). С. 138–146. DOI: 10.51608/26867818_2023_3_138.

18. Степанова В.Ф., Спивак Н.А., Королева Е.Н. Влияние степени коррозионного поражения арматуры на совместную работу с бетоном // *Вестник НИЦ «Строительство»*. 2024. № 40(1). С. 105–116.

19. Николюкин А.Н. Моделирование совместной работы арматуры с бетоном на примере композитной арматуры: дис. канд. техн. наук. Ростов-на-Дону, 2021. 190 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 21.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 21.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 691.11

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения; 2.1.5. Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2026_2_132

АНАЛИЗ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ НАГРУЖЕНИИ ВДОЛЬ И ПОПЕРЕК ВОЛОКОН

© Авторы 2026

SPIN: 4845-3197

СЕЛЯЕВ Владимир Павлович

академик РААСН, доктор технических наук, профессор

Российская академия архитектуры и строительных наук; РААСН;

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва;

(Россия, Саранск, e-mail: ntorm80@mail.ru)

SPIN: 5150-5308

АРХИПОВ Игорь Владимирович

аспирант

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

(Россия, Саранск, e-mail: arhipov_igor2000@list.ru)

SPIN: 4583-2960

ЛАЗАРЕВ Александр Львович

кандидат технических наук, доцент

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва

(Россия, Саранск, e-mail: aleks-laz@yandex.ru)

Аннотация. В статье изложены результаты анализа экспериментальных данных, полученных при испытании деревянных образцов-кубов вдоль и поперек волокон при скорости нагружения 0,5 мм/мин. Предложена модель описания процесса разрушения древесины с учетом наблюдаемых «петель гистерезиса», характеризующих отказ структурного блока или блоков, на диаграммах «нагрузка-деформации».

Ключевые слова: древесина; механика разрушения; твердое тело; отказ; петли гистерезиса

Для цитирования: Селяев В.П., Архипов И.В., Лазарев А.Л. Анализ диаграмм деформирования древесины при нагружении вдоль и поперек волокон // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 132-137. doi:10.51608/26867818_2026_2_132.

Original article

ANALYSIS OF DIAGRAMS OF WOOD DEFORMATION DURING LOADING ALONG AND ACROSS THE FIBERS

© The Author(s) 2026

SELYAEV Vladimir Pavlovich

Academician of the RAACS, Doctor of Technical Sciences, Professor,

Head of the Department of "Building Structures"

Russian Academy of Architecture and Construction Sciences;

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev

(Russia, Saransk, e-mail: ntorm80@mail.ru)

ARKHIPOV Igor Vladimirovich

PhD Candidate

National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev

(Russia, Saransk)

LAZAREV Alexander Lvovich



Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev
(Russia, Saransk; e-mail: delmira2009@yandex.ru)

Abstract. The article presents the results of the analysis of experimental data obtained during the testing of wooden sample cubes along and across fibers at a loading rate of 0.5 mm/min. The model describing the process of wood degradation is suggested, taking into account the "hysteresis loops" that indicate structural block failure, as seen in "load-deformation" diagrams.

Keywords: wood; mechanics of destruction; solid body; rejection; hysteresis loops

For citation: Selyaev V.P., Arkhipov I.V., Lazarev A.L. The effect of chlorine ions on the chemical resistance of cement composites // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 132-137. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_132.

В основе механизма разрушения строительных материалов обычно лежит подход, основанный на гипотезах классической механики деформируемых твердых тел, в которых: структура материала представляется как однородная, изотропная и сплошная среда; процесс разрушения принято рассматривать как мгновенный акт, который наступает, как только некоторый критерий достигает своего критического значения: нормальных напряжений (Г. Галилей); удлинений (Б. Мариотт); касательных напряжений (Ш. Кулон); или совместное действие касательных и нормальных напряжений (О. Мор) [1].

Родоначальником подобного подхода к анализу природы разрушения твердых тел принято считать Г. Галилея, который под разрушением подразумевал разделение образца на отдельные части в результате достижения предельных нормальных напряжений в конкретной точке объема.

Пригодность данных гипотез распространялась только на материалы, имеющие идеальную однородную структуру. Однако, исходя из анализа результатов научных исследований, в мире практически не существует материалов, которые имели бы однородную, бездефектную структуру. В результате чего не всегда результаты расчетов, полученные при применении рассматриваемого метода, соответствовали действительности.

Следующую ступень развития теории разрушения обычно связывают с исследованиями Г. Колосова, который теоретически доказал, что напряжения в объеме твердого тела распределяются неравномерно и возможна концентрация напряжений, обусловленная дефектами структуры. Вместе с тем А. Йоффе и А. Гриффитс экспериментально установили, что прочность твердого тела зависит от наличия дефектов в структуре образца [2].

На современном этапе исследователи все чаще приходят к выводу, что разрушение твердого тела — это не мгновенный акт, но процесс, протекающий во времени. Здесь стоит отметить работы А.П. Филина, Л. М. Качанова, А. А. Ильюшина, В. В. Новожилова, В. П. Селяева и др. [3-5].

Экспериментальные данные О. Я. Берга показывают, что прочность твердых тел напрямую свя-

зана с особенностями их внутренней организации. Основные прочностные и деформационные свойства, а также механизм разрушения твердого тела в большей мере определяются его структурной неоднородностью [6].

Наиболее применяемые при изготовлении строительных конструкций материалы — бетон и древесина, отличаются высокой неоднородностью структуры.

Древесина — сложный волокнистый материал, представляющий собой природный композит со сложной иерархически организованной структурой, все масштабные уровни которой вносят вклад в ее механические свойства. В структуре древесины можно выделить несколько иерархических уровней: атомно-молекулярный (атомные и химические связи); наноуровень (нановолокна); микроуровень (микрофибрилы); мезоуровень (клетки, сосуды, смоляные ходы); макроуровень (годичные кольца, дефекты в виде трещин и т. д.).

Бетон — материал с многомасштабной, инвариантной неоднородностью структуры: зернами заполнителя, наполнителями, раковинами, порами и т.д. Поэтому механизм разрушения бетона, древесины и других материалов с неоднородной структурой неоднозначный, многоуровневый, не поддающийся описанию на основе принципов классической механики твердого тела.

Многоуровневый, многомасштабный механизм разрушения структуры бетона четко прослеживается на диаграммах деформирования, полученных при испытании в динамическом (непрерывном) режиме нагружения на сжатие при постоянной скорости деформирования (0,5 мм/мин). Получены диаграммы деформирования, которые наглядно отражают дискретно-непрерывный характер разрушения структуры бетона и подтверждают предположение о блочно-иерархическом строении структуры бетона [5].

Для исследования характера работы древесины при сжатии нами проведен подобный эксперимент.



Для экспериментальных исследований были изготовлены образцы из древесины сосны 1-го сорта размерами 100x100x100 мм. Влажность образцов в пределах нормы 8-12%. Испытания проводились для образцов вдоль и поперек волокон.

По результатам испытаний образцов на сжатие были получены диаграммы деформирования вдоль (рис. 1, 2) и поперек (рис. 4, 5) волокон.

Анализируя диаграммы «нагрузка-деформации» древесины вдоль волокон необходимо отме-

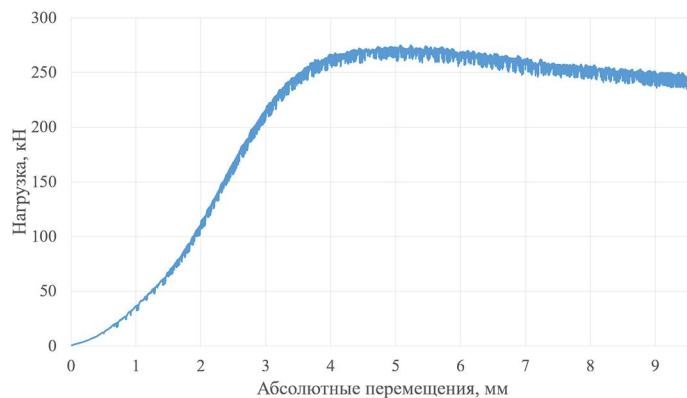


Рис. 1. Диаграмма деформирования образца 100x100x100 мм вдоль волокон

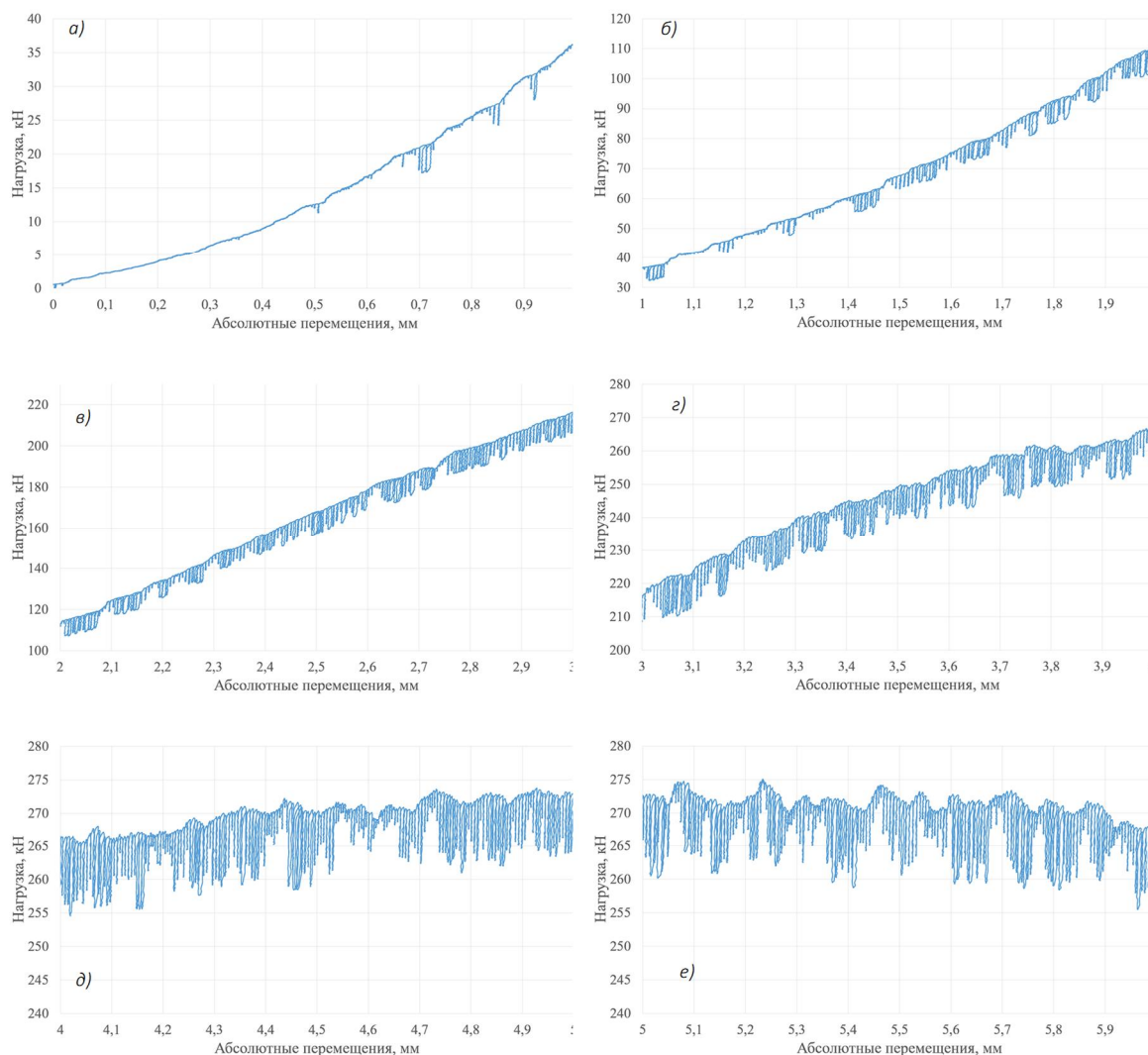


Рис. 2. Участки диаграммы деформирования образца 100x100x100 мм вдоль волокон: а – участок 0-1 мм; б – участок 1-2 мм; в – участок 2-3 мм; г – участок 3-4 мм; д – участок 4-5 мм; е – участок 5-6 мм



тить наличие таких же «петель» сброса нагрузки и деформаций, как и при разрушении бетонных кубов, выполненных в работе [5]. Это позволяет сделать вывод о том, что разрушение древесины также носит дискретно-непрерывный характер.

На первом и втором участках (рис. 2 а, б) происходит загрузка всех волокон образца вертикальной нагрузкой, при этом происходит местное смятие древесины под захватами пресса, которое выражается в виде сгруппированных участков сброса нагрузки и деформаций (образование петель). Приблизительно к середине второго участка у отметки 60- 70 кН начинается упругая стадия работы материала, завершение процесса местного смятия и выравнивание зависимости «нагрузка-деформации» до прямой линии. В этот момент наблюдается значительный рост числа (интенсивности) отказов, что подтверждает описанный выше механизм работы материала. При достижении нагрузки около 60 % (третий участок- рис. 2 в) от максимальной нагрузки кривая деформирования начинает постепенно отклоняться от линейной зависимости между усилием и деформациями. Это хорошо соотносится с общепринятыми представлениями о начале необратимых деформаций в зоне $0,6P_{max}$.

Однако поскольку каждая из рассматриваемых петель на участке характеризует разрушение одного структурного блока в пределах одного масштабного уровня, то это свидетельствует о том, что необратимые деформации возможны и на участке упругой деформации.

Подсчитав количество сбросов нагрузки (отказов), можно построить график изменения частоты отказов с ростом деформаций (рис. 3). График накопления повреждений соответствует классическим представлениям (моделями) о накоплении повреждений в сложных системах.

Характер диаграмм «нагрузка-деформации» при сжатии образцов древесины поперек волокон вполне соответствует классификации, предложенной П.Н. Хухрянским (см. рис. 4) [7]:

- 1) на первом этапе наблюдается линейная зависимость «нагрузка-деформации». Деформирование древесины подчиняется закону Гука, а в конце этого этапа достигается условный предел пропорциональности;
- 2) второй этап характеризуется криволинейным участком с пологим подъемом;
- 3) третий этап отличается прямолинейным участком с крутым подъемом, в конце которого в об-

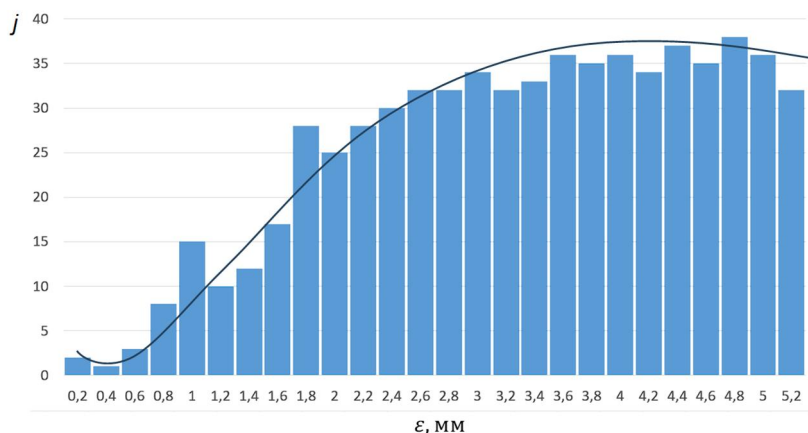


Рис. 3. Гистограмма частоты отказов в интервале $\Delta \epsilon$ с ростом абсолютных перемещений ϵ , мм

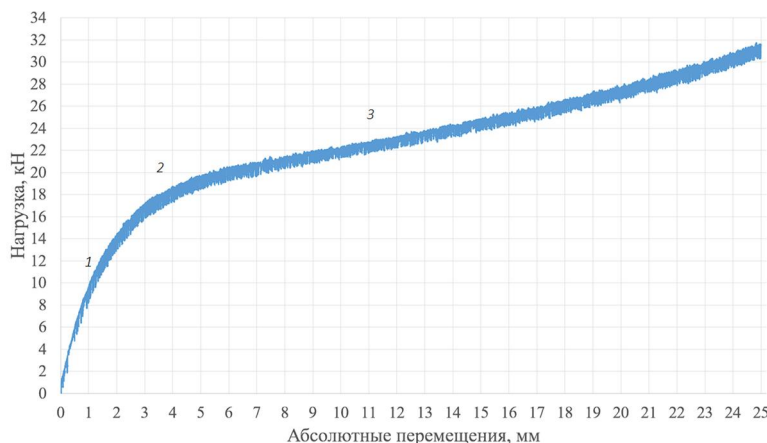


Рис. 4. Диаграмма деформирования образца 100x100x100 мм поперек волокон



разце появлялись трещины и разрушения от боковых выпучиваний.

При анализе диаграмм деформирования древесины поперек волокон наблюдается подобный ме-

ханизм образования «петель» сброса нагрузки и деформаций, как и в случае сжатия образцов вдоль волокон. Наличие подобных «петель» в обоих случаях на наш взгляд характеризуется тем, что при разруше-

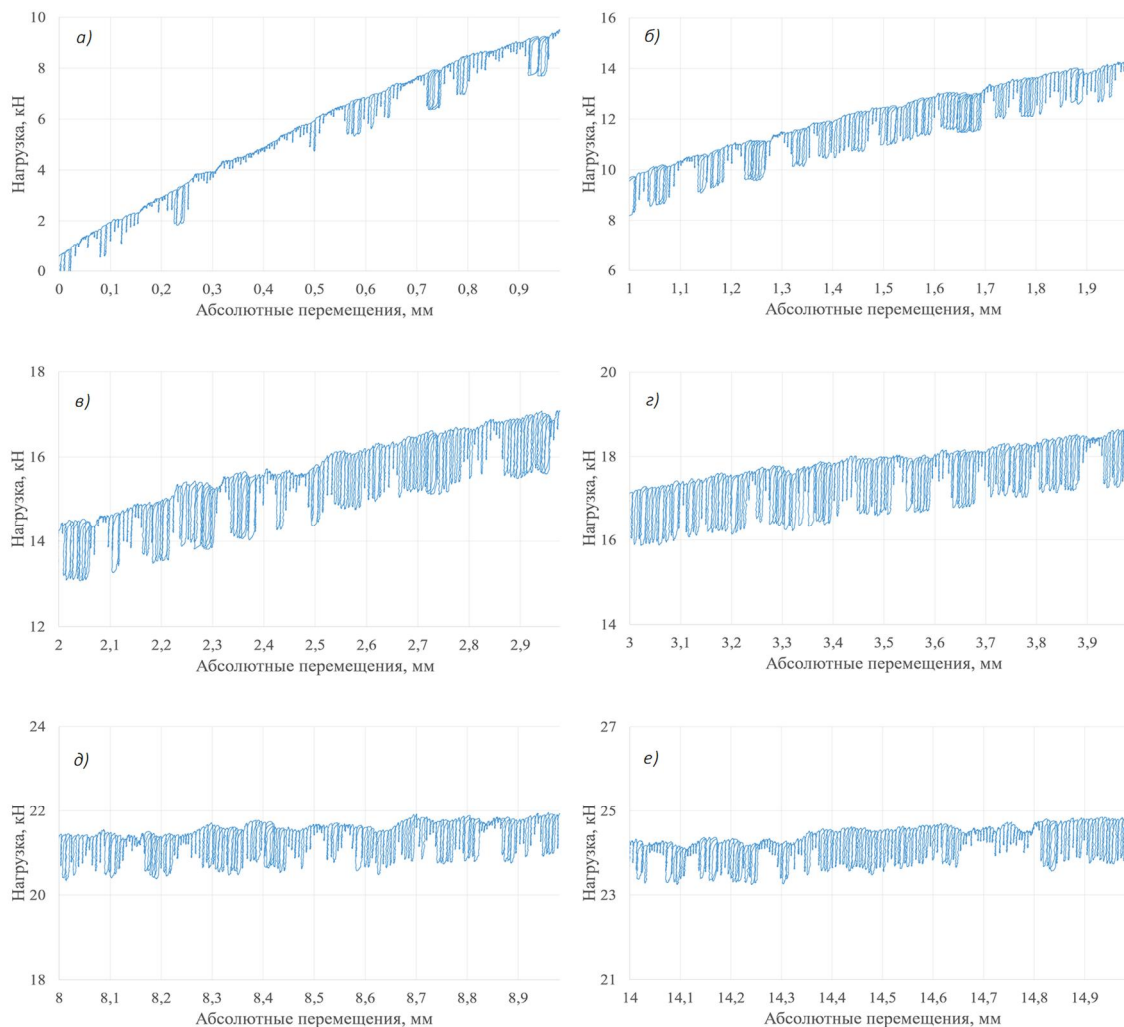


Рис. 5. Участки диаграммы деформирования образца 100x100x100 мм поперек волокон: а – участок 0-1 мм; б – участок 1-2 мм; в – участок 2-3 мм; г – участок 3-4 мм; д – участок 8-9 мм; е – участок 14-15 мм

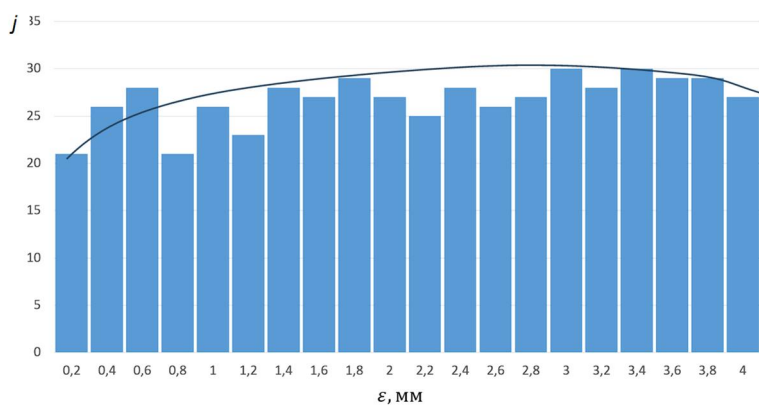


Рис. 6. Гистограмма частоты отказов в интервале $\Delta \epsilon$ с ростом абсолютных перемещений ϵ , мм



нии вдоль и поперек волокон на определенном масштабном уровне происходят идентичные процессы разрушения. Однако при переходе на некоторый определенный масштабный уровень выше механизм разрушения меняется за счет волокнистого строения материала, что характеризует его ортотропию, и диаграмма приобретает вид, представленный на рис. 4.

При анализе участков диаграммы (рис. 5) установлено, что в отличие от диаграммы деформирования древесины вдоль волокон наличие «петель», характеризующих отказ структурного блока или блоков, наблюдается уже с самого начала загрузки образца. Очевидно, это связано с процессом уплотнения волокон, которые по своей природе являются вытянутыми пустотелыми трубочками, сминающимися под действием сжимающей нагрузки. Наблюдается наличие «петель» в зоне упругой деформации. Это говорит о том, что деформации на этом участке на самом деле не являются полностью обратимыми.

Подсчитав количество сбросов нагрузки (отказов), построен график изменения частоты отказов с ростом деформаций (рис. 6). При этом график накопления повреждений несколько отличается от классического распределения.

Выводы. 1. Описание диаграмм деформирования древесины подтверждает многомасштабность ее строения структуры.

2. На основе анализа диаграмм «нагрузка-деформации» описаны механизмы работы древесины при нагружении вдоль и поперек волокон; Определено наличие отказов, возникающих в структуре древесины.

Библиографический список

1. Тимошенко, С.П. Механика материалов / С.П. Тимошенко, Дж. Гере; Пер. с англ. Л. Г. Корнейчука; под ред. Э.И. Григолюка. – Изд. Мир, 1976. – 669 с.
2. Griffith, A.A. The theory of rupture // In: Proc., Ist., Int., Congr., Appl., Mech. – Delft. 1924. – P. 55–63.
3. Филин, А.П. Прикладная механика твердого деформируемого тела. Т. 1. Сопротивление материалов с элементами теории сплошных сред и строительной механики / А.П. Филин. – М.: Наука, 1975. – 832 с.
4. Новожилов, В.В. О перспективах развития феноменологического подхода к проблеме разрушения твердых тел: докл. на Всесоюз. рабочем симпозиуме по вопросам малоциклового усталости / В.В. Новожилов. – Каунас, 1971. – 16 с.
5. Селяев В. П. Физико-химические основы механики разрушения цементных композитов. / В. П. Селяев, П. В. Селяев – Саранск, Изд-во МГУ им. Н. П. Огарева. 2018 – 220 с.
6. Берг, О.Я. Физические основы теории прочности бетона и железобетона/ О. Я. Берг. – М.: Стройиздат, 1961. – 96 с.
7. Хухрянский П. Н. Прочность древесины. – М., 1955.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 11.05.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 11.05.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья
УДК 691.115
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2026_2_138

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДРЕВЕСНО-РАСТИТЕЛЬНОГО СЫРЬЯ

©Автор, 2026
SPIN: 2883-1204

СМИРНОВА Ольга Евгеньевна
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой
Строительных материалов, стандартизации и сертификации
НГСУ (Сибстрин)
(Россия, Новосибирск, e-mail: o.smirnova@sibstrin.ru)

Аннотация. В статье исследованы физико-химические процессы характерные древесно-растительному сырью. Рассмотрены особенности химического и элементного состава сырья из отходов деревообработки и сельхозпереработки. Установлены закономерности в структуре древесно-растительного сырья различного вида на основе результатов инфракрасной спектроскопии. По результатам сравнительного анализа проведена оценка наличия и интенсивности пиков в определенных областях поглощения и определено соотношение основных компонентов древесно-растительного сырья: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы.

Ключевые слова: лигнин; спектроскопия; химический состав; древесина; костра льна

Для цитирования: Смирнова О.Е. Исследование физико-химических свойств древесно-растительного сырья // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 138-143. doi:10.51608/26867818_2026_2_138.

Original article

RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF WOODY PLANT RAW MATERIALS

© TheAuthor(s) 2026

SMIRNOVA Olga Evgenievna
Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor,
Head. Department of Building Materials, Standardization and Certification
Novosibirsk State University of Civil Engineering (Sibstrin)
(Russia, Novosibirsk)

Abstract. This article examines the physico-chemical processes occurring in wood and plant-based raw materials. The chemical and elemental composition of raw materials derived from wood and agricultural waste is examined. Patterns in the structure of various types of wood and plant-based raw materials are established using infrared spectroscopy. A comparative analysis is used to assess the presence and intensity of peaks in specific absorption regions and determine the ratio of the main components of wood and plant-based raw materials: lignin, cellulose, and hemicellulose.

Keywords: lignin, spectroscopy; chemical composition; wood; flax shives

For citation: Smirnova O.E. Research of physico-chemical properties of woody plant raw materials // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 138-143. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_138.

Введение. Материалы на основе древесно-растительного сырья характеризуются высокими теплотехническими показателями, кроме этого, с точки зрения экологии решается проблема утилизации сельскохозяйственных отходов и деревообработки. Также вовлечение древесно-растительных отходов в производство композиционных материалов позволяет уменьшать их себестоимость

за счет использования попутно получаемого, не находящего в настоящее время применения, сырья [1-3].

Рассматривая все сырьевые ресурсы древесно-растительного происхождения, следует отметить целый ряд объединяющих их свойств:

- по химическому и элементному составу,
- по степени агрегации,



– по возможности использования для тех или иных технологических переделов,
– по виду получаемых материалов и изделий.

Древесно-растительное сырье состоит из целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, представляя собой полярный, гидрофильный материал. Ключевые полярные группы — гидроксильные, карбоксильные, ацетильные, обеспечивающие водородные связи. Неполярные группы включают углеводородные скелеты целлюлозы и ароматические структуры лигнина [4-7].

Методы и материалы. В статье рассматривали древесно-растительное сырье характерное для Сибирского федерального округа, а именно:

- отходы сельхозпереработки - костру льна и солому (пшеница, рожь);
- отходы деревопереработки мягкие хвойные (сосна) - опилки, стружку, древесную муку.

Результаты. Элементный состав сырья и химический состав сырья исследовали методами спектроскопии, хроматографии на базе институтов СО РАН (Академгородок, Новосибирск).

В таблице 1 представлены данные химического состава по рассматриваемым видам древесно-растительного сырья, для усредненных проб сформированных методом смешивания.

Оценивая химический состав сырья древесно-растительного происхождения, можно установить следующую закономерность: целлюлозы в большем количестве содержится в отходах деревообработки, и она имеет более высокую степень полимеризации, т.к. цепи молекул прочно «сшиты» между собой множеством водородных связей (согласно результатам инфракрасной спектроскопии), что обеспечивает твердость волокон. В соломе и костре льна содержание целлюлозы меньше и составляет 32-37% и 21-30% соответственно, а само сырье более рыхлое и волокнистое. В древесном сырье (особенно хвойных пород) концентрация лигнина значительно выше и составляет от 20 до 35 % относительно 15-17% у соломы, при этом наибольшее содержание лигнина у костры льна – 30-38%.

Таблица 1 – Химический состав древесно-растительного сырья, %

Сырье	Целлюлоза	Лигнин	Гемицеллюлоза		Водорастворимые вещества	Зольность
			Гексозаны	Пентозаны		
Солома	32-37	12-17	–	28-37	0,5-1,8	2,4-7,2
Щепа	25-46	19-28	3-16	7-25	2,1-4,7	0,7-1,5
Опилки	42-51	25-34	7-16	5-26	5,3-10,6	0,4-1,1
Костра льна	21-30	30-38	12-15	26-35	1,6-2,5	1,8-5,6
Древесная мука	42-51	20-35	7-16	5-33	5,5-11,2	0,3-0,8
Стружка	30-40	21-32	5-15	10-28	4,2-6,9	0,2-1,0

Полученные данные химического анализа, объяснимы с точки зрения строения и функционального назначения сырьевых материалов, так в соломе гемицеллюлоза выступает более важным и объемным компонентом. При этом гемицеллюлоза в соломе представлена в основном ксиланами, полисахаридами с короткими боковыми цепочками, которые соединяют микрофибриллы целлюлозы и делают волокна более эластичными и гибкими, что важно для растительного сырья. В древесном сырье гемицеллюлозы на порядок меньше, и она представлена преимущественно маннанами, в отходах деревообработки сосны они присутствуют в виде сложного комплекса полисахаридов - глюкоманнана, цепочки которых состоят из молекул глюкозы и маннозы. Невысокий процент гемицеллюлозы в древесном сырье замещается высоким содержанием целлюлозы и лигнина, обеспечивающих жесткость и долговечность. Особенно повышенное содержание лигнина характерно для хвойных пород, больше всего лигнина содержится в плотной древесине (ядре), из которой и образуется основная масса мягких отходов деревообработки [8-10].

Анализируя далее результаты химического анализа сырья, можно отметить повышенное содержание лигнина в костре льна, что обусловлено развитыми механическими тканями стебля льна-долгунца, клетки которых имеют утолщенные стенки, пропитанные лигнином, который скрепляет длинные элементарные волокна в прочный пучок [11].

Содержание водорастворимых веществ в составе сырья важно при проектировании оптимального состава композита с высокими эксплуатационными свойствами, так как чем меньше таких веществ, тем более инертен наполнитель. Оценивая данные таблицы 1 по водорастворимым веществам, наиболее высокие показатели у опилок и древесной муки, наименьшие значения у соломы и костры льна. Такое соотношение водорастворимых веществ в древесных и растительных отходах получается за счет особенностей процесса переработки сырья, а именно: в процессе сельхозпереработки льна и пшеницы водорастворимые пектины и сахара, скрепляющие волокна в стебле, вымываются или разрушаются, а оставшиеся отходы содержат в основном одревесневшие частицы.

Также важным показателем древесно-растительного сырья является его зольность, характеризующая количество минеральных примесей в сырье, и напрямую влияющая на качество, прочность и долговечность композитов. Наибольшие показатели зольности отмечены у соломы и костры льна (5,6-7,2 %), минимальные у древесного сырья.

Органический элементный состав (С, Н, N, О) древесно-растительного сырья определяли на СНН-



анализаторе Evrovector 600. Прибор работает по принципу высокотемпературного сжигания пробы в токе кислорода с последующим разделением газов и детектированием. Значения стандартного отклонения полученных результатов находятся в пределах допуска погрешности $\approx 0,08$ для азота, $\approx 0,59$ для углерода и $\approx 0,16$ для водорода.

В таблице 2 приведены полученные данные, среднее значение коэффициента вариации находится в пределах 9,4-13,6%.

Таблица 2 – Элементный органический состав древесно-растительного сырья

Сырье	Органический элементный состав, % по массе			
	C	H	N	O
Щепа	43,7–49,1	4,4–6,1	0,1–0,4	40,4–43,8
Опилки	49,1–54,7	5,3–5,9	1,7–2,9	39,1–44,5
Солома	34,8–40,3	5,5–6,2	0,5–1,3	37,4–41,1
Стружка	42,0–48,4	4,8–5,7	0,6–1,1	36,3–42,6
Древесная мука	49,6–52,4	5,2–7,0	0,2–0,5	40,8–43,4
Костра льна	44,2–53,1	5,8–6,6	0,1–1,2	35,2–42,6

По элементному составу можно сделать заключение о примерно одинаковых интервалах показателей содержания в древесно-растительном сырье углерода, азота, водорода и кислорода. Так, углерода в сырье содержится в среднем 35–50 %; водорода – 4–7 %; азота 0,1–3 % и кислорода 25–43 %.

Для определения минерального состава (зольных элементов) древесно-растительного сырья применялся рентгенофлуоресцентный анализ. Для количественного анализа сырье высушивалось, измельчалось и прессовались таблетки (пеллеты) для обеспечения плотности и однородности образцов. В таблице 3 приведены полученные данные, среднее значение коэффициента вариации находится в пределах 10,2-12,8%.

Таблица 3 – Элементный минеральный состав древесно-растительного сырья

Сырье	Минеральный состав золы, % к зольности				
	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	SO ₃
Щепа	1,9–5,7	29,3–38	0,1–1	3,2–4,7	3,5–7
Опилки	5,4–11,7	21,7–29,1	0,8–3,4	1,8–4,4	2,3–5,6
Солома	48,2–72	4,1–10,5	0,5–2,2	2,1–5,7	1,4–2,3
Стружка	4,1–10	29,2–34,6	0,9–1,8	2,5–3,6	1,1–3,7
Древесная мука	2,3–7,6	34,4–43,8	0,1–1,9	3,7–6,5	1,8–6,2
Костра льна	13,1–20,2	19,3–34,5	1,2–2,7	3,3–7,6	0,7–3,4

Примечание: для определения содержания элементов в массе сырья, значения минерального состава золы нужно умножить на коэффициент зольности (например, при зольности опилок сосны 0,4%, коэффициент равен 0,004).

Рассматривая состав золы, можно отметить, повышенное содержание диоксида кремния ($\approx 45-70$ %) у соломы, достаточно высокие значения у костры льна (до 20%), т. е. у растительных отходов. Для древесного сырья эти показатели не превышают

10%. Это объясняется отложением кремния в виде аморфного кремнезема в клеточных стенках растительного сырья, для обеспечения быстрой жесткости стебля за счет более короткого жизненного цикла. Тогда как в древесном сырье прочность обеспечивается по мере роста за счет природного полимера лигнина, и кремний в основном концентрируется преимущественно в коре и хвое, а не в самой древесине [12,13].

Содержание оксида кальция в золе древесного сырья больше, чем в растительном, и составляет $\approx 21 - 44\%$, т.к. изначально древесное сырье содержит высокие значения кальция, необходимые для формирования древесных тканей (лигнина).

Элементный состав древесно-растительного сырья важен при подборе оптимальных видов связующих, обеспечивающих высокие адгезионные свойства композиционных материалов.

Обсуждение. Закономерности в структуре древесно-растительного сырья различного вида исследовали методом инфракрасной спектроскопии. Вещественный состав исходных компонентов изучался с помощью инфракрасной спектроскопии на ИК-спектрометре «ScimitarFTS 2000» (рис. 1, 2). Для исследования ИК-спектров сырья готовились твердые образцы методом прессования таблеток с KBr. Сырье предварительно высушивалось при температуре 50°C и растиралось в агатовой ступке. Количество исходного вещества 1 мг на 6 KBr. Далее приготавливалась таблетка, и записывался спектр вещества.

ИК спектр костры льна показывает основные колебания в области 3500-2800 см⁻¹ и 1750-1050 см⁻¹. Широкой и сильной является полоса поглощения в области 3500-3100 см⁻¹ с максимумом при ≈ 3412 см⁻¹, которая связана с валентными колебаниями различного типа гидроксильных групп. Полосы в области 3000-2800 см⁻¹ относятся к валентным колебаниям V (CH) метильных и метиленовых групп, деформационные колебания этих групп расположены в интервале 1460-1360 см⁻¹. Полоса 1923 см⁻¹ характерна для колебаний метоксидов, связанных с ароматическим ядром и валентными колебаниями CH в CH₂ и CH₃ группах. Полоса 1852 см⁻¹ соответствует валентным колебаниям C-N связей в метоксильных группах.

Метиленовые группы придают углеводам гидрофильность (способность впитывать влагу), а связи -CH₂- в лигнине отвечают за термостойкость материала. На присутствие лигнина указывают интенсивные полосы поглощения при 1653 см⁻¹, а также полосы в области 1540-1510 см⁻¹, характерные для колебаний колец [14,15].

В области 1250-1050 см⁻¹ наблюдается интенсивная структурированная полоса (*max* 1048 см⁻¹). Здесь проявляются деформационные колебания δ

(ОН) и (С-О) групп, а также валентные колебания ν (С-ОН) групп, полосы поглощения которых перекрываются. Гидроксильные группы вызывают фоновое поглощение в интервале $700\text{--}500\text{ см}^{-1}$.

Валентные колебания ν (С=О) карбонильных групп характерны для (-COCH₃) ацетильные групп гемицеллюлоз, наблюдается высокая интенсивность для ацетилированного глюкоманнана, который ча-

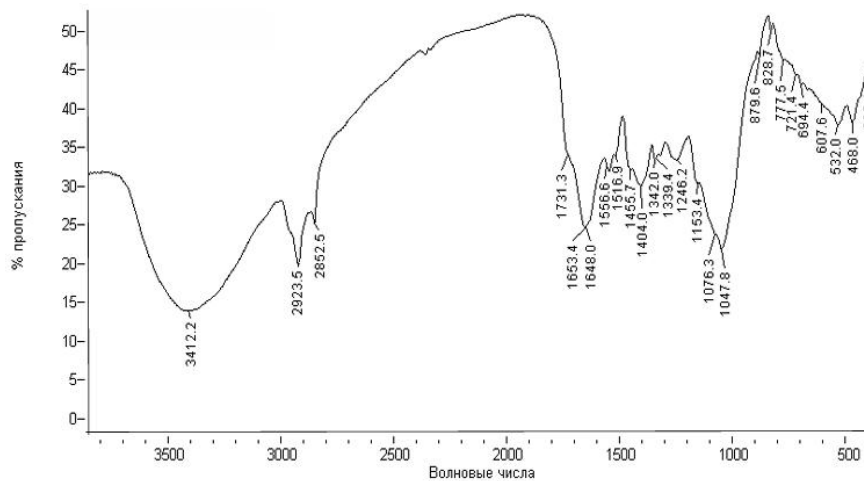


Рис. 1. ИК – спектр образца костры льна

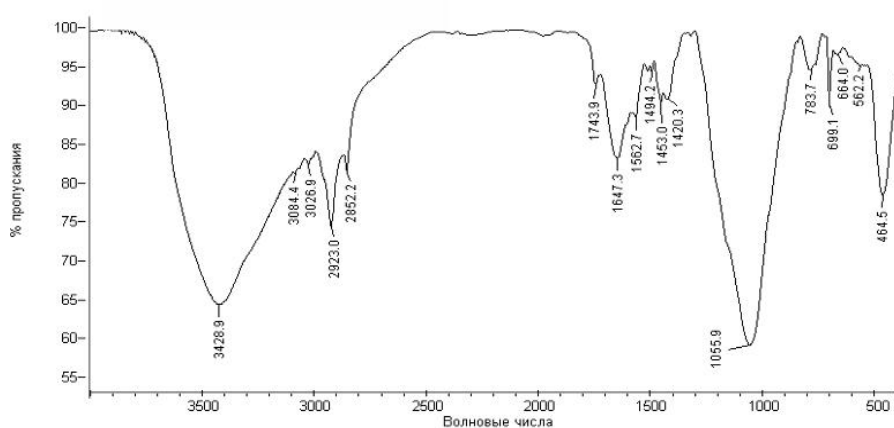


Рис. 2. ИК – спектр образца опилок сосны

ИК-спектры мягких отходов деревообработки хвойных пород: стружки, опилок и древесной муки схожи между собой, интенсивность пиков характеризует разное содержание целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Так в области $3500\text{--}3400\text{ см}^{-1}$ у образца опилок (рис.2) имеется интенсивный пик $\approx 3430\text{ см}^{-1}$ присущий валентным колебаниям ν (-ОН) гидроксильных групп, и указывающий на присутствие в образце целлюлозы. Пики $\approx 3084\text{ см}^{-1}$ и $\approx 3027\text{ см}^{-1}$ характерны для валентных колебаний ν (С-Н) метильных и метиленовых групп и указывают на содержание целлюлозы и гемицеллюлозы. Пики средней 1453 см^{-1} и слабой интенсивности $\approx 1420\text{ см}^{-1}$ соответствуют деформационным колебаниям δ (С-Н) и δ (С-О) групп и характеризуют наличие целлюлозы и лигнина.

стично замещает молекулы гемицеллюлозы в образце опилок сосны, и представлены пиком средней интенсивности $\approx 1744\text{ см}^{-1}$.

Валентные колебания ароматического кольца лигнина (скелетные колебания) характеризуются пиками сильной $\approx 1648\text{ см}^{-1}$ и средней $\approx 1563\text{ см}^{-1}$ интенсивности. При этом интенсивная полоса поглощения $\approx 1056\text{ см}^{-1}$ в области $1200\text{--}1000\text{ см}^{-1}$ свидетельствует о преобладании в лигнине гваяциловых (скелет С₆-С₃ с- СН и -О-Н группой в 3-м и в 4-м положении бензольного кольца) структурных единиц, характерных для образцов хвойных пород.

Внеплоскостные деформационные колебания гидроксильных групп лежат в области $790\text{--}650\text{ см}^{-1}$ и характеризуются пиками средней интенсивности $\approx 784\text{ см}^{-1}$, $\approx 699\text{ см}^{-1}$ и 664 см^{-1} .



Таким образом ИК-спектры древесно-растительного сырья позволяют дать качественную (область 3500-1500 см⁻¹) и количественную (область ниже 1500 см⁻¹) характеристику компонентов, входящих в состав исследуемых образцов. При этом наличие и интенсивность соответствующих полос поглощения, характеризует связи, существующие между макромолекулами целлюлозы, лигнина и гемицеллюлозы. Сравнительная оценка результатов инфракрасной спектроскопии древесно-растительного сырья приведена в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнительная оценка полос поглощения древесно-растительного сырья

Функциональная группа	Положение полос поглощения, см ⁻¹				
	Костра льна	Солома	Стружка	Опилки	Древесная мука
-ОН гидроксильные группы	ν валентное колебание				
	3412.2	3398.5	3421.5	3428.9	3435.2
	δ деформационное колебание				
	694.1 532	677.3 530.8	598.2 550.1	699.1 562.2	700.8 680.4
-CH₂, -CH₃ метильные и метиленовые группы	ν валентное колебание				
	2923.5	2920.4	3076.7	3084.4	3002.8
	δ деформационное колебание				
	1455.7 1342.1	1451.2 1330.8	1455.9 1398.1	1453 1420	1460 1380
C=O, -COOH карбонильные/ карбоксильные группы	ν валентное колебание				
	1731.3	1783.9	1728.4	1743.9	1705.3
C=С ароматическое кольцо	ν валентные колебания				
	1653.4	1630.1	1640.9	1647.3	1650.7
C-С ароматические скелеты	ν валентные колебания				
	1556.6	1523.7	1557.1	1562.7	1559
C-H связи ароматического кольца	плоскостные δ деформационные колебания				
	1076	1036.8	1046.4	1055.8	1072
	внеплоскостные δ деформационные колебания				
	879.6 828.7	871.2 802.4	875.2 818.6	сл.	877.5 819.1

По всем спектрам можно отметить сходство исследуемого органического сырья, а именно, характерны:

- валентные колебания различного типа гидроксильных групп в области 3500-3100 см⁻¹ и фоновое поглощение в интервале 700-500 см⁻¹ этих же групп;

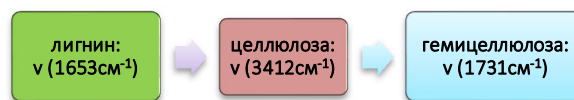
- метильных и метиленовых групп в области 3000-2800 см⁻¹ и деформационные колебания этих групп в интервале 1460-1360 см⁻¹;

- на присутствие лигнина указывают интенсивные полосы поглощения при 1653 см⁻¹, а также полосы в области 1540-1510 см⁻¹, характерные для колебаний колец; интенсивность пиков в этих областях указывает на повышенное содержание лигнина.

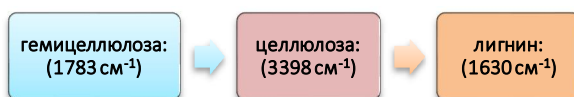
Согласно таблице 4 по наличию и интенсивности пиков в определённых областях поглощения

можно оценить соотношение основных компонентов древесно-растительного сырья: лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы и получить следующие ранжированные ряды (от большего к меньшему содержанию):

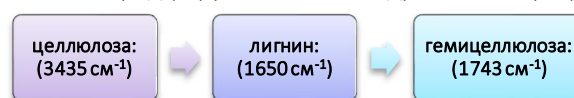
- для образцов костры льна:



- для образцов соломы:



- для образцов отходов деревообработки хвойных пород (стружки, опилок и древесной муки):



Таким образом полученные закономерности коррелируют с данными химического состава. Древесное сырье обладает более высокой полярностью и гидрофильностью за счет большего количества гидроксильных групп, чем растительное, которое в больших количествах содержит ароматические и углеводородные фрагменты, обеспечивающие гидрофобность.

Заключение. 1. По результатам химического анализа древесно-растительного сырья установлена следующая закономерность: целлюлозы в большем количестве содержится в отходах деревообработки, и она имеет более высокую степень полимеризации, в соломе и костре льна содержание целлюлозы меньше и составляет 32-37% и 21-30% соответственно, а само сырье более рыхлое и волокнистое. В древесном сырье концентрация лигнина значительно выше и составляет от 20 до 35 % относительно 15-17% у соломы, при этом наибольшее содержание лигнина в костре льна – 30-38%, что обусловлено развитыми механическими тканями стебля льна-долгунца, клетки которых имеют утолщенные стенки, пропитанные лигнином, который скрепляет длинные элементарные волокна внутри стебля.

2. По результатам инфракрасной спектроскопии установлены наибольшие валентные колебания различного типа гидроксильных групп в области 3500 см⁻¹ и деформационные колебания в интервале 700-500 см⁻¹ этих же групп для образцов отходов деревообработки хвойных пород (стружки, опилок и древесной муки); наибольшие валентные колебания (C=O) карбонильных групп характерны для (-COCH₃) ацетильных групп гемицеллюлоз и установлены у образцов соломы; повышенное содержание лигнина установлено у образцов костры льна и подтверждено интенсивными полосами поглощения при



1653 см-1, а также полосами в области 1540-1510 см-1, характерными для колебания колец.

3. Полученные физико-химические данные свойств древесно-растительного сырья позволяют рекомендовать для использования в производстве композитов не моно- а поликомбинированные наполнители с целью создания синергии компонентов, т.к. при перемешивании древесных и растительных элементов моделируется композиционная структура, где компоненты с высоким содержанием лигнина дополняют компоненты с меньшим его количеством. В результате проектирование оптимального набора поликомбинированных наполнителей позволит получать композиционный материал с повышенными прочностными свойствами, при сохранении структуры лигноуглеводного комплекса, высоких теплоизоляционных характеристик и пониженной плотности.

Библиографический список

1. Новицкая Ю.Е., Габукова В.В. Биохимический состав сосновой коры // Изучение химического состава коры хвойных и ее использование в целлюлозно-бумажном производстве. Петрозаводск, 1987. С. 5–15.
2. Азаров В.И., Буров А.В., Оболенская А.В. Химия древесины и синтетических полимеров. СПб., 1999. 628 с
3. Khan S.H., Rahman M.Z., Haque M.R., Hoque M.E. Characterization and comparative evaluation of structural, chemical, thermal, mechanical, and morphological properties of plant fibers // Annual Plant: Sources of Fibres, Nano cellulose and Cellulosic Derivatives. Singapore: Springer, 2023. P. 1–45.
4. Смирнова, О. Е. и др. Эффективные технологии при использовании растительного сырья в строительстве / монография – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2020. – 224 с.
5. Черкашина Н.И., Ручий А.Ю., Пушкарская Д.В., Кужелева А.А., Литвинова Ю.И. Получение высокодисперсного наполнителя для строительных композиций из отходов производства льна. Нанотехнологии в строительстве. 2026.18(1):82–92.

6. Пичугин А.П. Композиционные прессованные материалы на основе органического сырья / Пичугин А.П., Смирнова О.Е., Хританков В.Ф. // Эксперт: теория и практика. 2023. № 2 (21). С. 75–81.

7. Вахнина Т.Н., Сусоева И.В., Титунин А.А. Оценка влияния структуры и химического состава растительного наполнителя на свойства композитов теплоизоляционного назначения // Лесной вестник. 2019. 23(1):94–101.

8. Смирнова О.Е. Адгезионная прочность в структуре композиционных материалов на основе органического сырья / Смирнова О.Е., Пичугин А.П., Хританков В.Ф. // Строительные материалы. 2024. № 5. С. 17–21.

9. Корчагина А.А., Гладышева Е.К., Будаева В.В., Скиба Е.А. Химический состав волокна и костры лубяных культур и продуктов их щелочной делигнификации // Известия вузов. Прикладная химия и биотехнология. 2023. Т. 13. N 4. С. 621–630.

10. Угрюмов С. А. Совершенствование технологии производства композиционных материалов с использованием древесных отходов // Актуал. направления науч. исслед. XXI в.: теорияипрактика. 2014. Т. 2, ¹ 22 (72). С. 160–164.

11. Ranveer R. C., Tapre A. R., Rathod N. B., Sakhale B. K. Enzymatic extraction of pigments from agroprocessing waste // ValueAddition in Agri Food Industry Waste Through Enzyme Technology / M. Kuddus, P. W. Ramteke (Eds.). Amsterdam: Elsevier, 2023. P. 191–198.

12. Sangaré D., Caré F., Buron F., Lafite P., Bostyn S. Numerical modeling and evaluation of solid liquid extraction with pressurized hot water extraction applied to Robinia pseudoacacia wood // Chem. Eng. Process. ProcessIntensif. 2024. Vol. 195. Art. 109605.

13. Судакова И.Г., Кузнецов Б.Н., Гарынцева Н.В., Королькова И.В. Состав и связующие свойства лигнинов, полученных окислительной делигнификацией древесины пихты, осины и березы в среде уксусной кислоты // Химия растительного сырья. 2010. №3. С. 55–60.

14. Хергер Г.Л. ИК-спектры лигнина // Лигнины / Под ред. К.В. Сарканена и К. Х. Людвиг. М., 1975. 632 с.

15. Котлярова, И. А. ИК-спектроскопия древесины сосны, березы и дуба, модифицированной моноэтаноламин(n→b)тригидроксиборатом / И. А. Котлярова // Химия растительного сырья. – 2019. – № 2. – С. 43–49. – DOI 10.14258/jcprpm.2019024609. – EDN HBMSVN.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.05.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 11.05.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья
УДК 691.327.333
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2026_2_144

ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕАВТОКЛАВНОГО ПЕНОБЕТОНА И ОЦЕНКА СТРУКТУРООБРАЗУЮЩЕЙ РОЛИ ПОРИСТОСТИ КОМПОЗИТА

©Авторы, 2026
SPIN: 3528-7452

ЧЕРКАСОВ Василий Дмитриевич
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой Прикладная механика
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
(Россия, Саранск, e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru)

SPIN: 6345-0914

ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Иванович
кандидат технических наук, доцент кафедры Прикладная механика
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
(Россия, Саранск)

Аннотация. Высокие эксплуатационные характеристики неавтоклавно пенобетона достигаются формированием равномерно распределенной пористой структуры материала, которая не только улучшает его теплотехнические свойства, но и повышает прочностные характеристики. Представлены результаты исследований структуры пенобетона, показывающие, что полученный ячеистый композит преимущественно обладает закрытой пористостью и высоким показателем однородности пор. Выполненные теоретические изыскания свидетельствуют о том, что методами механики твердого деформируемого тела можно связать структурную перестройку микроячейки композита с упругими свойствами материала отдельных ее компонентов, величинами их напряжений. Проведены исследования цилиндрической (капиллярной) модели ячейки композита, в которой материал твердой фазы обладает неоднородностью непрерывного типа. Разработана модель оценки прочности материала, раскрывающая структурообразующую роль пористости материалов.

Ключевые слова: неавтоклавный пенобетон; структура; прочность; пористость; ячейка; неоднородность; поровое давление; напряжение; эпюра

Для цитирования: Черкасов В.Д., Емельянов А.И. Исследование структуры неавтоклавно пенобетона и оценка структурообразующей роли пористости композита // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 144-149. doi:10.51608/26867818_2026_2_144.

Original article

THE STRUCTURE STUDY OF A NON-AUTOCLAVED FOAM-CONCRETE AND EVALUATION OF THE STRUCTURALLY SHAPING ROLE OF COMPOSITE TOLERANCE

© The Author(s) 2026

CHERKASOV Vasily Dmitrievich
Corresponding Member of the RAACS, Dr. of Technical, Prof.,
Head of the Department
RAACS; *National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev*
(Russia, Saransk, e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru)

YEMELYANOV Alexey Ivanovich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev (Russia, Saransk)

Abstract. The high performance characteristics of non-autoclaved foam concrete are achieved by forming an evenly distributed porous structure of the material, which not only improves its thermal properties but also enhances its strength. The results of



research on the structure of foam concrete are presented, showing that the obtained cellular composite predominantly has closed porosity and a high degree of pore homogeneity. The theoretical investigations that have been carried out show that it is possible to connect the structural adjustment of the composite microcell to the elastic properties of the material of its individual components and the magnitude of their stresses by methods of mechanics of a solid deformable body. Studies of a cylindrical (capillary) model of a composite cell were carried out, in which the solid phase material has heterogeneity of continuous type. An evaluation model of material strength has been developed, revealing the structurally forming role of materials' porosity.

Keywords: non-autoclaved foam-concrete; structure; strength; porosity; cell; heterogeneity; pore pressure; tension; diagram

For citation: Cherkasov V.D., Yemelyanov A.I. The structure study of a non-autoclaved foam-concrete and evaluation of the structurally shaping role of composite tolerance // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 144-149. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_144.

Введение. Проблема снижения теплопотерь в зданиях заставляет ученых и практиков все чаще обращать внимание на энергоэффективные стеновые материалы ячеистой структуры. К числу таких материалов относятся неавтоклавные пенобетоны, отличительными особенностями которых является высокая универсальность, относительная простота технологии получения при невысоком уровне производственных затрат [1-7].

Производство пенобетонов по неавтоклавному технологии имеет ряд недостатков и нуждается в повышении качества выпускаемых изделий. Высокие эксплуатационные характеристики ячеистого композита достигаются формированием равномерно распределенной пористой структуры материала, которая не только улучшает теплотехнические свойства, но и повышает прочностные характеристики.

Цель работы – исследование структуры неавтоклавных пенобетонов и изучение структурообразующей роли пористости композита.

В соответствии с поставленной целью исследованы вопросы влияния сырьевых компонентов и технологических параметров на формирование прочностных структур ячеистого композита. По результатам проведенных исследований разработаны составы неавтоклавных пенобетонов плотностью 400...800 кг/м³ [8], составы которых представлены в табл. 1.

Таблица 1– Влияние состава сухой смеси на свойства пенобетона

Плотность пенобетона, кг/м ³	Материалы				Прочность пенобетона при сжатии, МПа
	Цемент, кг	Мел, кг	Пенообразователь ¹ , %	Сульфат железа ² , %	
400	255	109	1,8	19	0,9
500	318	137	1,64	19	1,4
600	382	163	1,54	19	1,9
700	445	191	1,49	19	2,6
800	509	218	1,4	19	3,5

1 - пенообразователь в сухой смеси берется от массы цемента;
2 - сульфат железа используется во всех составах в качестве добавки, стабилизирующей пену и берется от массы пенообразователя.

Отличительным свойством теплоизоляционных материалов является высокая пористость, суще-

ственно снижающая их теплопроводность. На теплопроводность большое влияние оказывают вид пористой структуры материала, размер и форма пор. Лучшую теплоизоляционную способность имеют материалы с замкнутыми сферическими порами [9].

С увеличением размеров пор и превращением их в открытые каналы ухудшаются теплозащитные свойства материала, поэтому при производстве энергоэффективных стеновых изделий необходимо стремиться к получению равномерно распределенной пористой структуры. В связи с этим, выполнена оценка показателей пористости выполнялась в соответствии с методикой ГОСТ 12730.4 – 78 по результатам определения их плотности, водопоглощения и сорбционной влажности. Параметрами, характеризующими пористость являются: полный объем пор P_n , объем открытых капиллярных P_o и некапиллярных $P_{мз}$ пор, объем условно-закрытых пор P_z , показатель микропористости $P_{мк}$, показатели среднего размера пор λ и однородности размеров пор α (табл. 2).

Таблица 2– Показатели пористости пенобетона

Плотность пенобетона, кг/м ³	Показатели пористости						
	P_n , %	P_o , %	$P_{мз}$, %	P_z , %	$P_{мк}$, %	λ	α
450	80,9	18	4	58,9	0,59	1,1	1,0
590	74,9	21	3,3	50,6	0,54	1,0	0,95

Согласно полученным данным (табл. 2) пенобетон преимущественно обладает закрытой пористостью, что так же подтверждается микроснимками структуры композита (рис. 1). Показатель однородности пор высокий.

Применение ячеистых бетонов в строительстве происходит в условиях непрерывно возрастающих требований к их физико-техническим характеристикам. Удовлетворение этих требований невозможно без развития исследований в области микромеханики строительных композиционных материалов, направленных на изучение характера изменения их структуры и параметров качества в процессе производства и эксплуатации.

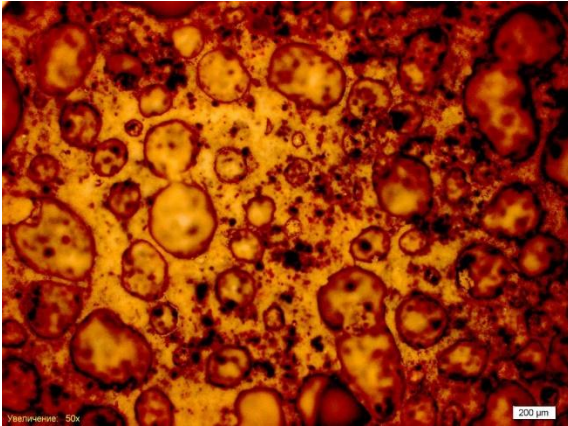


Рис. 1. Микроснимки структуры пенобетона

В этой связи проведены исследования цилиндрической (капиллярной) модели ячейки композита, в которой материал твердой фазы обладает неоднородностью непрерывного типа. Структурную модель ячейки капиллярно-пористого композита представим прямолинейным капилляром, имеющим длину L , внутренний a и внешний b радиусы кругового сечения. Замкнутая пористость композита при достаточно большой величине отношения L/b будем считать равной объемной доле канала в капиллярной ячейке:

$$\Pi = \frac{\pi a^2 L}{\pi b^2 L} = \left(\frac{a}{b}\right)^2 = \omega^2, \quad (1)$$

где ω – отношение радиусов капилляра (a/b).

Капилляр испытывает действие внутреннего (порového) (p) и наружного (q) давлений. При отсутствии объемных деформаций под действием этих давлений материал капилляра и сжимается, и растягивается в каждой его точке, что происходит за деформаций цилиндрического сдвига. Капилляр из однородного материала $q/p = \Pi$ расширяется [11] и испытывает действие растягивающих тангенциальных и сжимающих радиальных напряжений. Формулы для безразмерных напряжений (в долях от порového давления p) будут иметь вид:

$$S_r = \frac{\sigma_r}{p} = -1 + (1 - \Pi) \left[\frac{\frac{R_r}{R_1} - \frac{R_\omega}{R_1}}{1 - \frac{R_\omega}{R_1}} \right] \quad (2)$$

$$S_t = \frac{\sigma_t}{p} = -1 + (1 - \Pi) \left[\frac{\frac{1}{r^2} \frac{G(r)}{R_1} + \frac{R(r)}{R_1} - \frac{R_\omega(a)}{R_1}}{1 - \frac{R_\omega}{R_1}} \right] \quad (3)$$

где S_t и S_r – тангенциальные и радиальные напряжения

Π – пористость материала;

p – порového давление;

r – радиус сферического слоя;

R_1 и R_ω – радиусы граничных поверхностей капилляра (наружной и внутренней соответственно);

G – модуль сдвига.

Примем линейную функцию:

$$G(r) = G_1 (A_1 p + B_1), \quad (4)$$

коэффициенты которой составят:

$$A_1 = \frac{1-k}{1-\omega}; B_1 = \frac{k-\omega}{1-\omega}; k = \frac{G_\omega}{G_1} \quad (5)$$

где G_1 , G_ω – модули сдвига в точках граничных поверхностей капилляра (наружной и внутренней соответственно).

Выражениями (4), (5) задается спектр линейных функций $G(r)$, наклон которых к оси r ($\rho=r/b$) определяется параметром k . Графическое изображение пяти функций модуля сдвига в пределах толщины стенки капилляра представлено на рисунке 2. Вычисления выполнены для материала с пористостью $\Pi = \omega^2 = 0,36$ при следующих значениях параметра k : 0; 0,36; 0,6; 1,0; 1,5.

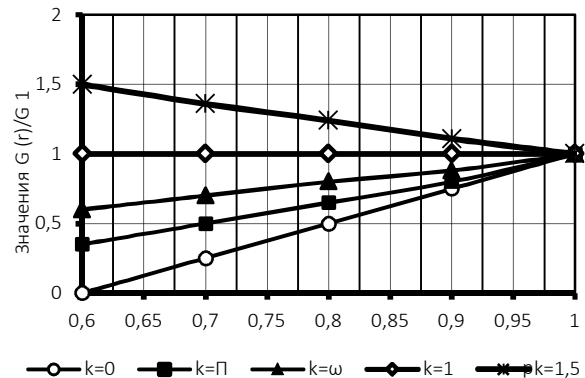


Рис. 2. Линейная зависимость модуля сдвига для ячеек с отношением $\omega=0,6$

Из полученных данных (рис. 2) следует, что (с увеличением координаты ρ) при значениях $k < 1$ величина модуля $G(r)$ возрастает, а при $k > 1$ – убывает. Значению $k=1$ отвечает случай однородного материала, при этом выражения (2), (3) дают классическое решение задачи Ламе (для тонкостенного кругового цилиндра). Особо выделим материал, соответствующий параметру $k=\omega$, при котором коэффициенты $A_1=1$ и $B_1=0$. Их подстановка в выражение (4) дает функцию (изменения модуля сдвига), пропорциональную радиальной координате:

$$G(r) = G_1 \cdot r/b = G_1 \rho \quad (6)$$

Таким образом, формула напряжений для материалов, удовлетворяющих условию (6) принимает простой вид:



$$S_t = \frac{\sigma_t}{p} = -1 + (1 - \Pi) \left[\frac{1}{1 - \omega} \right] = \omega = \text{const} \quad (7)$$

Следовательно, при значении $k=\omega$ тангенциальные напряжения $\sigma_t = \omega p$ одинаковы во всех точках материала ячейки.

Результаты вычислений, выполненных по формулам (3), (4) представлены на рис. 3, 4 эпюрами тангенциальных напряжений по толщине ячейки капиллярно пористого композита. Эпюры построены для двух групп материалов, обладающих пористостью 25 и 36 %. Линейная неоднородность модуля сдвига для 1-й группы характеризуется параметрами k , равными 0; 0,25; 0,5; 1,0; 1,25, а для 2-й группы – 0; 0,36; 0,6; 1,0; 1,5.

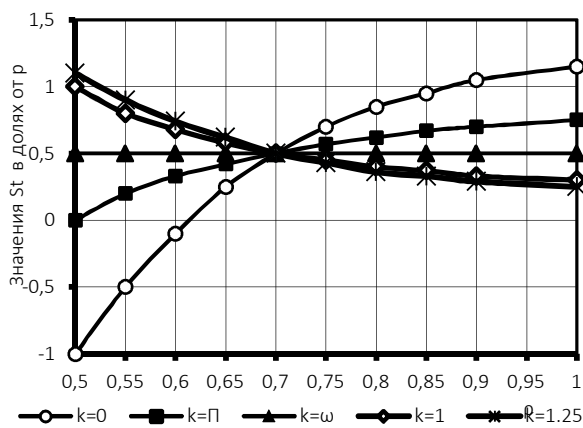


Рис. 3. Эпюры S_t для материалов с пористостью $\Pi=25\%$

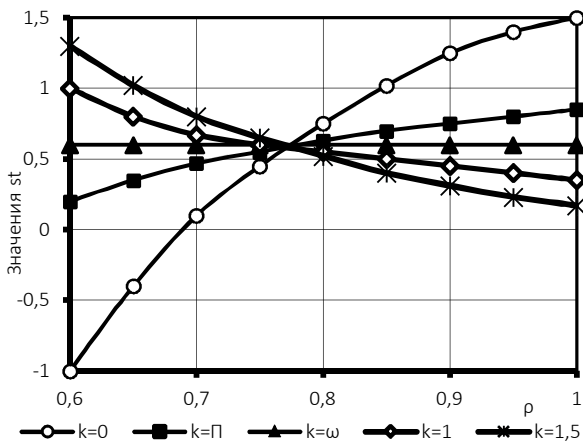


Рис. 4. Эпюры S_t для материалов с пористостью $\Pi=36\%$

На основании полученных результатов (рис. 3, 4) можно заключить:

1) при значениях $k>1$ растягивающие напряжения S_t^{max} будут действовать в точках поверхности капилляра, и они всегда больше аналогичных напряжений, возникающих в однородном материале ($k=1$). Существование подобных материалов (при значениях $k>1$) маловероятно, так как они склонны к

саморазрушению структуры уже на стадии формирования;

2) при $k=\omega$ эпюра S_t горизонтальна, тангенциальные напряжения $\sigma_t = \omega p$ одинаковы во всех точках твердой фазы капиллярной ячейки;

3) две эпюры любой пары эпюр напряжения S_t , отвечающей значениям параметров $k=n\omega$ и $k=\omega/n$, взаимно симметричны относительно эпюры со значением параметра $k=\omega$ (на рис. 3 такой паре соответствует значение $n=0,5$, а на рис. 4 – $n=0,6$). При этом

$$S_{t(k=\omega)} = \frac{S_{t(k=n\omega)} + S_{t(k=\omega/n)}}{2} \quad (8)$$

4) два значения ($k=n\omega$ и $k=\omega/n$), отвечающие паре взаимно симметричных эпюр, обладают свойством инверсии относительно значения $k=\omega$.

5) математический центр инверсии ($k=0$) не имеет образа, поэтому у эпюры S_t при $k=0$ нет симметричной ей;

6) точки пересечения всех эпюр ($\rho=0,71$ и $\rho=0,775$ соответственно) означают, что в капилляре существует цилиндрическая поверхность, в точках которой напряжения одинаковы ($\sigma_t = \omega p$) для всех материалов, т.е. независимо от значения параметра $k=G_\omega/G_1$.

На рис. 5 представлены эпюры радиальных напряжений (по толщине ячейки), построенные по формуле (2) с учетом (4) для материалов с пористостью $\Pi=25\%$. Исходя из полученных данных свойством инверсии обладают и радиальные напряжения.

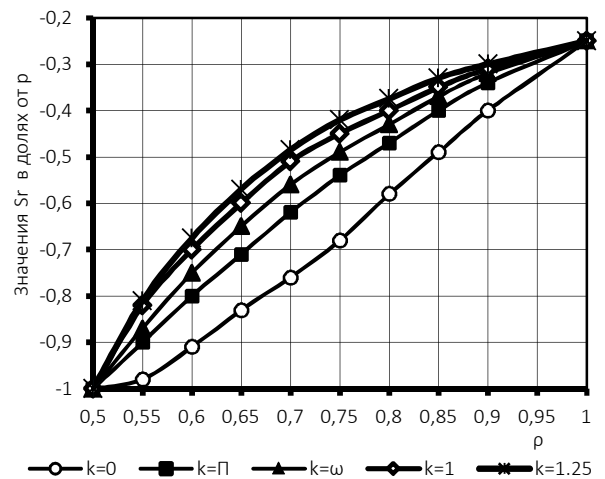


Рис. 5. Эпюры S_r для материалов с пористостью $\Pi=25\%$

Прочность ячейки капиллярно-пористого композита будем оценивать по 3-й теории прочности (теории Кулона). С этой целью найдем эквивалент-



ные напряжения, равные разности главных напряжений:

$$S_{экр} = \Delta S = S_t - S_r, \quad (9)$$

Выполнив подстановку напряжений определяемых выражениями (2), (3) в равенство (9) получим формулу для определения эквивалентных напряжений:

$$S_{экр} = (1 - \Pi) \frac{1G(r)/R_1}{r^2 1 - R_\omega/R_1} \quad (10)$$

где $G(r)/R_1$ и R_ω/R_1 определяются из выражений:

$$\frac{R_\omega}{R_1} = \frac{1}{\Pi} \frac{2A_1\omega + B_1}{2A_1 + B_1};$$

$$\frac{G(r)}{r^2 R_1} = -\frac{2}{p^2} \frac{A_1 p + B_1}{2A_1 + B_1} \quad (11)$$

На рис. 6, 7 представлены эпюры напряжений по толщине стенки капилляра, вычисленных по формуле (10) для двух групп материалов с различной пористостью – 25 и 36 %.

Анализ эпюр свидетельствует о существовании единственной точки их пересечения (точки на рис. 6, 7 аналогичны таковым на эпюрах тангенциальных напряжений (рис. 3, 4), но не совпадают с ними). При этом эпюры, отвечающие параметру $k=\Pi$, в отличие от всех других, содержат максимум в упомянутой ранее точке.

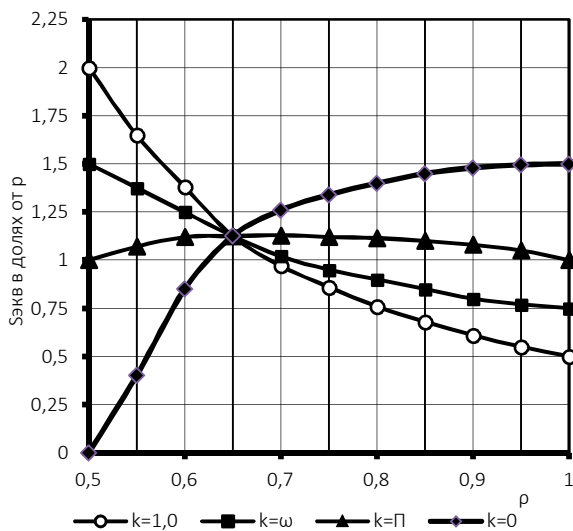


Рис. 6. Эпюры эквивалентных напряжений для материалов пористостью $\Pi=25\%$ и параметрами k равными 0; 0,25; 0,5; 1,0

Для определения координат данной точки исследуем функцию (10), в результате получим уравнение, решив которую найдем искомую координату:

$$\rho^* = \frac{2\omega}{1 + \omega} = 2 \frac{\sqrt{\Pi}}{1 + \sqrt{\Pi}} \quad (12)$$

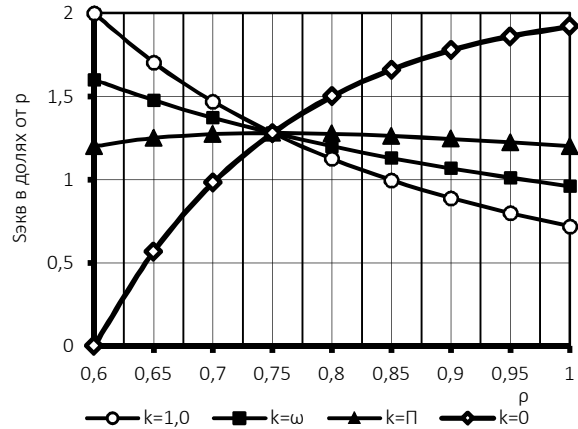


Рис. 7. Эпюры эквивалентных напряжений для материалов пористостью $\Pi=36\%$ и параметрами k равными 0; 0,36; 0,5; 1,0

Таким образом, при планировании экспериментов со строительными материалами необходимо стремиться к тому, чтобы фактическая неоднородность материала $G(r)$ как можно меньше отличалась от оптимальной неоднородности $G(r)_\Pi$, задаваемой функцией:

$$G(r)_\Pi = G_1 [(1 + \omega)\rho - \omega] \quad (13)$$

Заключение. Теоретические изыскания показывают, что методами механики твердого деформируемого тела можно связать структурную перестройку микрочаевки композита с упругими свойствами материала отдельных ее компонентов, величинами их напряжений. Проведенные исследования цилиндрической (капиллярной) модели ячейки композита, в которой материал твердой фазы обладает неоднородностью непрерывного типа, раскрывают структурообразующую роль пористости композитов. Анализ полученных выражений показывает, что показатели качества ячеистого композита существенно зависят не только от состава и свойств его компонентов, но и от начальных значений порового давления и пористости.

Библиографический список

1. Славчева Г.С. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства / Г.С. Славчева, Е.М. Чернышов, М.В. Новиков // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 20–24.
2. Леонович С.Н. Сухая смесь для получения жаростойкого пенобетона/ С.Н. Леонович, Д.В. Свиридов, А.Л. Беланович, В.П. Савенко, С.А. Карпушенков // Строительные материалы. – 2017. – № 7. – С. 25–29.
3. Машкин Н.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсно-армированный минеральными и волокнистыми добавками / Н. А. Машкин, А. И. Кудяков, Е. А. Бартьенева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2018. – №8. – С. 58 – 68.
4. Моргун В.Н. Свойства пенобетонов при их дисперсном армировании полипропиленовыми и углеродными волокнами / В. Н. Моргун, Л. В. Моргун // Строительные материалы. – 2022. – № 9. – С. 50–54.



5. Давидюк А.А. Преимущества в производстве и применении блоков из ячеистого бетона / А.А. Давидюк, Е.С. Фискинд, О.А. Гусарь, В.В. Балакирева В.В. // Строительные материалы. – 2018. – № 12. – С. 41–43.

6. Кудяков А.И. Цементный пенобетон неавтоклавного твердения с термомодифицированной торфяной добавкой / А.И. Кудяков, И.А. Прищепа, С.П. Осипов // Строительные материалы. – 2022. – № 1–2. – С. 40–49.

7. Местников А.Е. Цементный пенобетон из порландцементного клинкера и природного минерального сырья Арктической зоны России / А.Е. Местников, А.И. Кудяков, В.К. Рожин // Цемент и его применение. – 2020. – № 2. – С. 2–5.

8. Черкасов В.Д. Получение неавтоклавного пенобетона из сухих смесей и оценка его прочности с позиций

микромеханики композита / В.Д. Черкасов., А.И. Емельянов // Региональная архитектура и строительство.– 2024. – №4. – С. 110-116.

9. Горлов Ю.П. Огнеупорные и теплоизоляционные материалы / Ю.П. Горлов, И.Ф.Еремин, Б.У.Седунов. – М.: Стройиздат, 1976. – 192 с.

10. Дятков Е.М. Тугоплавкие теплоизоляционные материалы, полученные способами пенно-и газообразования / Е.М. Дятков, С.А. Гайлевич, Г.Я. Миненкова, С.Л. Радченко // Стекло и керамика. – 2002. – № 2. – С. 20–23.

11. Черкасов В.Д. Теория двухсвязных моделей микромеханики композитов / В.Д. Черкасов, А.С. Тюряхин. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та. – 2009. – 108 с.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.05.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 11.05.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 691.33.624.131.38

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.5 Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2026_2_150

ДЕФОРМАЦИОННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УКРЕПЛЕННЫХ ЦЕМЕНТНО-ВОДНОЙ КОМПОЗИЦИЕЙ ГРУНТОВЫХ ОТКОСОВ С ДОБАВКАМИ НАПРАВЛЕННОГО ДЕЙСТВИЯ

© Авторы, 2026

SPIN: 6626-3274

ПИЧУГИН Анатолий Петрович

доктор технических наук, профессор

Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологии

(Россия, Новосибирск, e-mail: gmunsau@mail.ru)

ЧЕСНОКОВ Роман Александрович

аспирант

Сибирский государственный университет инженерии и биотехнологии

(Россия, Новосибирск)

Аннотация. Эксплуатационные характеристики укрепляемого грунта откосов транспортных сооружений цементно-водными композициями способствуют закреплению грунта и повышению межремонтных сроков. При введении стабилизаторов грунта и компонентов проникающего действия совместно с цементом грунтобетонная смесь превращается в плотно сформированный прочный конгломерат. Ранее было доказано положительное влияние вводимых добавок и их совместимость с цементным вяжущим и грунтом, что способствовало укреплению земляного полотна откосов транспортных сооружений.

Ключевые слова: усадочные деформации; осадка грунтобетонной смеси; укрепление грунта; дисперсные минеральные добавки; расчет усадки укрепленного грунта

Для цитирования: Чесноков Р.А., Пичугин А.П. Деформационные характеристики укрепленных цементно-водной композицией грунтовых откосов с добавками направленного действия // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 150-154. doi:10.51608/26867818_2026_2_150.

Original article

DEFORMATION CHARACTERISTICS OF GROUND BANKS FORTIFIED WITH CEMENT-WATER COMPOSITION AND DIRECTED ADDITIVES

© The Author(s) 2026

CHESNOKOV Roman Aleksandrovich

PhD Candidate

Siberian State University of Engineering and Biotechnology

(Russia, Novosibirsk)

PICHUGIN Anatoly Petrovich

Doctor of Sciences (Technical), Professor

Siberian State University of Engineering and Biotechnology

(Russia, Novosibirsk)

Abstract. The operational characteristics of the reinforced soil of the slopes of transport structures with cement-water compositions contribute to the consolidation of the soil and increase the inter-repair periods. When stabilizers of the soil and penetrating components are introduced together with cement, the soil-concrete mixture turns into a densely formed strong conglomerate. Previously, the positive effect of the introduced additives and their compatibility with the cement binder and soil were proved, which contributed to the strengthening of the earthwork of the slopes of transport structures.

Keywords: shrinkage deformations; settlement of soil-concrete mixture; soil reinforcement; dispersed mineral additives; calculation of shrinkage of reinforced soil



For citation: Chesnokov R.A., Pichugin A.P. Deformation characteristics of ground banks fortified with cement-water composition and directed additives // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 150-154. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_150.

Введение. Известно, что грунтовые откосы транспортных сооружений и береговые участки предпортовых сооружений подвержены интенсивному воздействию дождевых и талых вод, увлажнению и высушиванию, замораживанию и оттаиванию. Кроме того, на них воздействуют механические нагрузки и усилия от транспортных средств и других разрушающих факторов, например, обледенения или волновой накат. В свете этого такие конструктивные элементы должны быть укреплены соответствующим образом путем создания облицовок, цементации, силикатизации, полимеризации и пр.

Одним из эффективных способов укрепления земляных массивов является укрепление цементным вяжущим, что обеспечивает структуризацию грунта и повышение прочности именно в первой зоне.

Проблемам укрепления грунтов портландцементом и известью посвящены многочисленные труды отечественных и зарубежных исследователей: В.М. Безрука, В.И. Бируля, Ю.М. Васильева, Л.В. Гончаровой, В.А. Кельмана, Л.А. Маркова, В.М. Могиловича, В.В. Охотина, О.В. Тюменцевой, М.М. Филатова, Н.Я. Хархута, С.W. Correns, С.S. Dunn, J. Hashimoto, R.C. Mainfort и др. Многие работы посвящены изучению взаимодействия компонентов цементогрунтов и активностью минерального вяжущего в грунтах различного вида, а также деформативным характеристикам укрепленных грунтов. Именно от этих характеристик на границе контактных зон материалов происходят структурообразующие процессы, обеспечивающие сохранность и длительность работы укрепляемых грунтовых конструкций [1-4].

В теоретических работах рассматриваются различные модели формирования и деформирования укрепленных грунтов. Наиболее распространена в инженерной практикетеория линейного деформирования, обладающая простотой и доступностью математического аппарата и базирующаяся на теории упругости для напряжённо-деформированного состояния грунтов. В модели Пастернака вводятся два коэффициента постели: коэффициент сжатия и коэффициент сдвига, что исключает недостатки первой модели. Ещё одна модель, учитывающая дискретность грунта, связывает все свойства грунта (уплотнение, разуплотнение, упрочнение и др.) воедино [3-6].

В работе использовали следующие компоненты и составы. На первых этапах исследований для укрепления в работе приняты глинистые грунты как достаточно распространенные по всей территории

Западной Сибири, представленные суглинками низкой прочности, тяжелыми, пылеватыми, твердыми.

В качестве минерального вяжущего в работе был использован портландцемент марки 400 Д20 Искитимского цементного завода (ГОСТ 10178-85 «Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия»). Для повышения жесткости, снижения усадочных деформаций и лучшего восприятия климатических воздействий на укрепляемый грунт были рекомендованы добавки отходов хризотилцементного производства (ОХЦП). В качестве стабилизаторов грунта были использованы: «Акропол», полимерная добавка «NicoFloK», ферментный препарат "Дорзин". Для более полного проникновения пропитывающей композиции в грунт использованы гидроизоляционные составы «Дегидрол» и «Лахта» способные проникать глубоко в массив при попадании такой гидроизоляции на поверхность грунта. По результатам многочисленных испытаний был сделан выбор в пользу «Акропола» и «Дегидрола», составы которых, взаимодействуя с компонентами грунта, создают прочную и водостойкую структуру.

Методическое обеспечение исследований.

Для конкретного расчета деформации укрепленных грунтов авторами использована следующая методика, позволяющая определять конкретные данные по осадке грунтового основания в широком диапазоне нагрузок и воздействий [1-4; 7]. При мощности активной зоны $H_{\alpha} < \beta_{cp}$, где β_{cp} - ширина насыпи по средней линии; Прогноз длительной осадки осуществляется по схеме одномерного сжатия. На участке первичной осадки время достижения реальным слоем относительной деформации λ при нагрузке p (P) определяется по формуле:

$$T_{\lambda p} = b_{\lambda p} H_{\phi}^2 \quad (1)$$

где b - консолидационный параметр, величина которого зависит от расчетной нагрузки p и относительной деформации λ ; H_{ϕ} - расчетный путь фильтрации воды, отжимаемой из слоя, принимаемый равным мощности слоя при одностороннем дренировании и половине мощности при двухстороннем дренировании.

Параметр b определяется по результатам консолидационных испытаний образцов с различными условиями дренирования

$$b_{\lambda p} = \frac{t_2 - t_1}{3\lambda_{2\phi}^2} \quad (2)$$



где t_1 - время достижения заданной относительной деформации при уплотнении под нагрузкой p образца высотой h при двустороннем дренировании

$$h_{1\phi} = \frac{h_{сб} p}{2}; \quad (3)$$

При небольшом диапазоне изменения нагрузок прогноз длительности осадки на этом участке может быть осуществлен по формуле:

$$T_{\lambda} = \frac{b_{\lambda}}{p - p_{\lambda}} H_{\phi}^2, \quad (4)$$

где b – консолидационный параметр, аналогичный b , но независимый от нагрузки p , устанавливаемый экспериментально.

На участке вторичной консолидации прогноз осадки во времени осуществляется по формуле:

$$\lambda_{II} = \lambda_I + m_p \lg \frac{T}{T_I}, \quad (5)$$

где λ_I и m_p - параметры консолидации кривой, определяемые экспериментально; T – время окончания участка первичной осадки при реальном слое, устанавливаемое по формуле (4) при $\lambda = \lambda_I$.

При приближенных прогнозах для стадии первичной осадки величину b можно определить по формуле:

$$b_{\lambda p} = \frac{K_u}{C_k}, \quad (6)$$

где C_k - коэффициент консолидации, определяемый непосредственно путем консолидационных испытаний; K_u - коэффициент, величина которого зависит от степени консолидации

$$U = \frac{\lambda_I}{\lambda_I}, \quad (7)$$

определяемой по справочным таблицам; λ - относительная деформация образца грунта при расчетной нагрузке, отвечающая завершению фазы первичной осадки, устанавливаемая по консолидационным кривым.

Экспериментальные исследования. Береговые откосы речных долин можно условно разделить на три характерных зоны. Первая, верхняя по течению с наибольшим уклоном i_1 называется зоной эрозии. Вторая – представляет собой средний участок с уклоном i_2 и называется зоной транзита наносов. Третья - нижняя по течению реки, характеризуется наименьшим уклоном реки i_3 и называется зоной концентрации наносов [2]. Известно, что наиболее часто подверженными разрушению участками береговых откосов являются верхние зоны (рис. 1), поэтому авторами были проведены все эксперименты именно по укреплению грунта в верхних зонах.

Ранее авторами были отработаны рациональные рецептуры и определены основные свойства укрепленных глинистых грунтов путем разработанной технологии с использованием многорядного дренера (кротователя) [1]. Поэтому в данной статье приведены результаты дальнейших деформационных исследований.

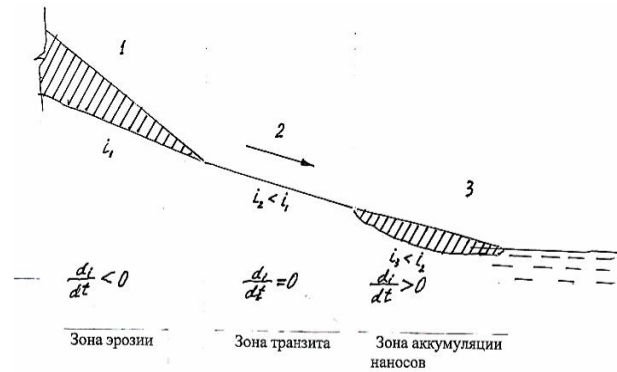


Рис. 1. Схема деления береговых откосов на участки эрозийного воздействия

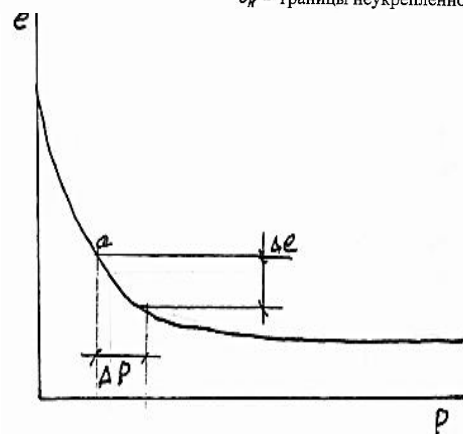
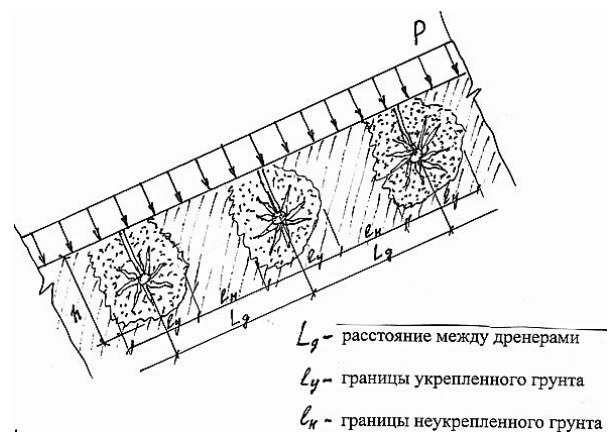


Рис. 2. Схема уплотнения грунта после укрепления цементно-водной композицией при воздействии равномерно распределённой нагрузки

Авторами предложен оригинальный способ укрепления грунтовых откосов путем прохождения многорядного дренера, оснащенного форсунками с цементным раствором и добавками направленного



действия. Дренеры проходят на глубине 0,1-0,2 м в глубину предварительно спланированного грунта и в оставленную полость нагнетается пропитывающая композиция. Проникая в разрыхленную часть грунта, цементный раствор соединяется с грунтовой массой, образуя плотную структуру, укрепляющую откос транспортного сооружения. Следует отметить, что предлагаемый способ позволяет максимально оставить неразрушенной поверхность грунтового основания, что обеспечивает лишь локальное нарушение в местах прохождения дренажа. Вводимые при этом стабилизаторы грунта и составы проникающего действия способствуют расширению охвата укрепляемого грунта [1-2]. Расчетная схема фрагмента укрепленного грунта предложенным методом представлена на рис. 2.

На элементарном участке кривой уплотнения слоя грунта при сплошной равномерно распределенной нагрузке можно рассмотреть приращение нагрузки P и можем получить соответствующее значение e , и определить пористость по следующей упрощенной формуле:

$$e = e_0 - \beta P, \quad (8)$$

где β - коэффициент сжимаемости, измеряемый в МПа^{-1} и определяемый как

$$\beta = \frac{\Delta e}{\Delta P}, \quad (9)$$

В соответствии с формулой (8)

$$e_{\text{шт}}^{\text{шт}} = e_0 - \beta \cdot \sigma_{\text{сш.г}}, \quad (10)$$

$$e_{\text{шт}}^{\text{нубл}} = e_0 - \beta \cdot (\sigma_{\text{сш.г}} + \sigma_{\text{нз}}). \quad (11)$$

Расчет осадки можно производить по нескольким вертикалям.

Для конкретного случая с влажными суглинистыми грунтами толщина элементарного слоя будет находиться в пределах 0,2-0,3 м; остальные параметры для расчета будут следующими:

$$e_0 = 0,63; \gamma = 22,3 \text{ кН/м}^3; \beta = 0,00007 \text{ кПа}^{-1}.$$

Расчет прочностных показателей и значений осадки укрепленного грунта осуществлялся в соответствии с действующими нормативными документами по испытанию и соответствующим рекомендациям не ранее 28 суток твердения [7].

Результаты экспериментальных исследований. Грунбетонные смеси приготавливались таким образом, чтобы обеспечить равномерное распределение вводимых добавок. Поэтому стабилизаторы грунта и составы проникающего действия вначале тщательно смешивались с цементом, а потом эта

масса соединялась с грунтом и перемешивание продолжалось не менее 3-5 минут, что обеспечивало равномерное распределение всех добавок и гарантировало качество укрепленного грунта. В таблице представлены составы и результаты испытаний укрепленного грунта.

Таблица – Свойства укрепленного цементно-водной композицией грунта с отходами ХЦП и различными добавками

№ п/п	Состав компонентов (кроме грунта – 100%), %				Результаты испытаний				
	Цемент	ОХЦП	Дегид-рол	Акро-пол	Плотность, кг/м ³	Прочность на изгиб,	Прочность на сжатие,	Коэффициент пористости	Усадка, %
1.	6,0	-	-	-	1,84	0,14	0,76	0,42	14,9
	8,0	-	-	-	1,86	0,33	1,23	0,41	13,6
	10,0	-	-	-	1,87	0,39	1,65	0,40	12,2
2.	6,0	5,0	-	-	1,82	0,66	2,07	0,43	9,4
	8,0	5,0	-	-	1,83	1,13	3,68	0,42	9,3
	10,0	5,0	-	-	1,84	1,28	3,96	0,41	9,1
3.	6,0	5,0	1,0	-	1,84	1,08	4,12	0,42	7,6
	8,0	5,0	1,0	-	1,86		4,75	0,41	7,3
	10,0	5,0	1,0	-	1,87	1,25	5,04	0,40	7,5
4.	10,0	5,0	1,0	0,05	1,88	1,37	5,56	0,34	6,5
	10,0	5,0	1,0	0,10	1,91	1,64	6,38	0,35	6,4
	10,0	5,0	1,0	0,15	1,93	1,75	6,41	0,33	6,4

Твердение и упрочнение грунтоцемента осуществляется на протяжении длительного времени за счет компонентов, способных к гидратационному твердению минералов и оксидов, содержащихся в системе «вяжущее–грунт» преимущественно следующих реакций с образованием гидросиликатов и гидроалюминатов кальция за счет гидратации клинкерных минералов с активными кремнеземом и глиноземом, находящимися в грунте и добавках [10-12]. Важным этапом проводимых исследований в дальнейшем является изучение длительной прочности и деформационных характеристик во времени, что осуществляется в настоящее время. Результатом этого этапа изучения свойств укрепленного грунта стало окончательное подтверждение оптимального состава компонентов и снижение усадочных деформаций путем использования добавок направленного действия.

Выводы. Проведенные экспериментальные исследования укрепленных цементно-водной композицией с добавками грунтов позволили выявить эффект использования применяемых добавок. Так, введение отходов хризотилцементного производства привело к снижению усадочных деформаций на пять и более процентов, а в совокупности с дегидролом и акрополом величина усадки укрепленного грунта снизилась в два раза. При этом, для оптимальных составов значительно снизилось значение коэф-



фициента пористости, что в дальнейшем способствует увеличению не только прочностных показателей, но и таких важных эксплуатационных характеристик, как водостойкость и морозостойкость.

Библиографический список

1. Чесноков Р.А., Пичугин А.П., Костин В.В. Укрепление грунтовых откосов цементно-водной композицией с добавками направленного действия // Известия вузов. Строительство, 2026. – №3. С.56-65
2. Наумов, Г. Г. Антропогенные воздействия на русловые процессы на переходах через водотоки: монография / Г. Г. Наумов. – М.: МАДИ, 2012. – 105 с
3. Ребиндер, П.А. Физико-химическая механика, как основа закрепления грунтов в дорожном строительстве и производстве строительных материалов на основе грунтов / П.А. Ребиндер // Труды совещания по теоретическим основам технической мелиорации грунтов. - МГУ, 1961. - С. 4-12.
4. Безрук, В.М. Укрепленные грунты (Свойства и применение в дорожном и аэродромном строительстве) / В.М. Безрук. - М.: Транспорт, 1982. - 231 с.
5. Могилевич, В.М. Дорожные одежды из цементогрунта / В.М. Могилевич, Р.П. Щербакова, О.В. Тюменцева - М.: Транспорт, 1972. - 215 с.
6. Славущий, А.К. Автомобильные дороги: Одежды из местных материалов / А.К. Славущий. - М.: Транспорт, 1987. - 255 с.
7. Гавриленко, Т.В. Расчёт осадки насыпи методом послойного суммирования URL: <http://road-project.okis.ru> 2018-05-15.
8. Бройд, И.И. Струйная технология строительства подземных сооружений. Современное состояние и направления развития. // ВНИИТПИ. Обз. инф. Арх-ра и стр-во. Вып. №2. Тех-ия, механизация и автоматизация в строительстве. М. 1995. 69 с.
9. Гончарова, Л.В. Основы искусственного улучшения грунтов (техническая мелиорация). М.: Моск. ун-т. 1973. –373с., ил.
10. Коновалов, П.А. Основания и фундаменты реконструируемых зданий. М.: Стройиздат, 1989. 136 с.
11. Токин, А.Н. Фундаменты из цементогрунта. М.: Стройиздат. 1984. 184 с.
12. Улицкий В.М., Богов С.Г. Комплексное использование струйной технологии для целей реконструкции на слабых грунтах. Реконструкция Санкт-Петербурга - 2005. Материалы 3-го международного симпозиума 16-20 мая 1994.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 23.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 23.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 697.112 : 536.2.022

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.5 Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2026_2_155

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СНИЖЕНИЯ ТЕРМИЧЕСКОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ
МНОГОСЛОЙНЫХ ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЁТОМ РЕАЛЬНОГО
ТЕМПЕРАТУРНО-ВЛАЖНОСТНОГО РЕЖИМА И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ

©Автор, 2026
SPIN: 2051-6993

ШКИЛЬНЮК Максим Александрович
ст. преподаватель кафедры ПГС; аспирант
Белорусско-Российский университет;
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого
(Беларусь, Могилёв, e-mail: eeld9696@gmail.com)

Аннотация. *Постановка задачи.* Нормативные расчёты термического сопротивления ограждающих конструкций выполняются при фиксированных условиях эксплуатации (А или Б), что не отражает ни реального температурно-влажностного режима в слоях конструкции, ни прогрессирующей деградации теплофизических характеристик в процессе её жизненного цикла. *Цель исследования* – разработка уточнённой расчётной модели, связывающей реальную сорбционную влажность материалов с изменением коэффициента теплопроводности и учитывающей категорию технического состояния конструкции при прогнозировании фактического термического сопротивления. *Методы:* аналитическое решение связанной задачи тепло- и влагопереноса; натурные измерения термического сопротивления прибором ИТП-МГ4.03/10 «Поток»; группировка данных по четырём категориям технического состояния; сравнительный анализ фактических и расчётных показателей. *Результаты:* получена двухфакторная модель, позволяющая прогнозировать R_{fact} в зависимости от сорбционной влажности w и категории технического состояния K_{TC} . Установлено, что совокупный эффект двух факторов приводит к снижению R_{fact} относительно нормативного на 12–44 % для конструкций 3–4-й категорий. *Новизна:* впервые для условий Беларуси предложена модель, интегрирующая влажностную деградацию теплопроводности и эксплуатационный износ в едином расчётном выражении для нормируемых типов ограждений.

Ключевые слова: термическое сопротивление; ограждающие конструкции; сорбционная влажность; теплопроводность; деградация теплозащиты; техническое состояние; энергоэффективность

Для цитирования: Шкильнюк М.А. Прогнозирование снижения термического сопротивления многослойных ограждающих конструкций с учётом реального температурно-влажностного режима и технического состояния // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 155-159. doi:10.51608/26867818_2026_2_155.

Original article

FORECASTING THE REDUCTION OF THERMAL RESISTANCE IN MULTI-LAYER CLADDING STRUCTURES
CONSIDERING REAL TEMPERATURE-HUMIDITY REGIME AND TECHNICAL CONDITION

© The Author(s) 2026

SHKILNIUK Maxim Alexandrovich
Senior lecturer; PhD Candidate
Belarusian-Russian University; Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University
(Belarus, Mogilev, e-mail: eeld9696@gmail.com)

Abstract. *Problem statement.* Standard calculations of the thermal resistance of the fencing structures are carried out under fixed operating conditions (A or B), which do not reflect either any real temperature and humidity regime in the layers of the structure, nor progressive degradation of the thermophysical characteristics in the process of its life cycle. *The aim of the study* is to develop a refined computational model that links the actual sorption humidity of materials with the change in the coefficient of thermal conductivity and takes into account the technical condition of the structure when forecasting the actual thermal resistance. *Methods:* analytical solution of the related heat and moisture transfer problem; field thermal resistance measurements by ITP-MG4.03/10 "Potok" instrument; grouping data into four categories of technical condition; comparative analysis of actual and calculated indicators. Results: a two-factor model has been obtained, allowing to predict R_{fact} depending on the sorption humidity and technical condition category k_{TC} . It is found out that the combined effect of two factors leads to a decrease in R_{fact} compared to the normal state for structures of categories 3-4. *Novelty:* for the first time for Belarus conditions, a



model has been proposed that integrates moisture degradation, heat conductivity, and operational damage in a single calculation term for normalized types of fences.

Keywords: thermal resistance; fencing structures; sorption humidity; heat conductivity; degradation of heat shielding; technical condition; energy efficiency

For citation: Shkilniuk M.A. Forecasting the reduction of thermal resistance in multi-layer cladding structures considering real temperature-humidity regime and technical condition // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 155-159. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_155.

Введение. Строительная теплофизика наружных ограждающих конструкций является ключевым фактором эксплуатационной энергоэффективности жилых и общественных зданий. В большинстве действующих методик расчёт теплозащиты ведётся по нормативным значениям коэффициента теплопроводности материалов при фиксированных условиях эксплуатации А или Б, без явного учёта фактического температурно-влажностного режима в слоях ограждения [1; 4; 10]. Такой подход оправдан на стадии проектирования, однако в условиях длительной эксплуатации приводит к систематическому расхождению между расчётными и измеренными значениями сопротивления теплопередаче.

Результаты теплофизических исследований и натурных измерений показывают, что теплотехнические характеристики материалов существенно зависят от сорбционной влажности, а распределение влажности по толщине ограждающей конструкции определяется её конструктивным решением и реальными условиями эксплуатации [1; 4–7; 9]. Численный анализ процессов тепло- и влагопереноса подтверждает, что использование единых условий эксплуатации А или Б ко всем слоям многослойной стены может приводить к погрешности расчёта приведённого термического сопротивления до 10–16 % [1].

Дополнительным фактором является физический износ ограждающих конструкций: наличие дефектов, увлажнение, нарушения целостности теплоизоляционного слоя, старение материалов. По данным ряда натурных обследований снижение фактического термического сопротивления относительно проектного составляет 6–41 % и определяется преимущественно конструктивным решением и техническим состоянием ограждений, тогда как влияние типа материала существенно меньше [2-3; 9]. Наибольшие отклонения характерны для конструкций 3–4-й категорий технического состояния. Для достоверной оценки теплозащитных свойств наружных ограждающих конструкций в условиях эксплуатации необходимо совместно учитывать два взаимосвязанных фактора: изменение теплопроводности материалов в зависимости от сорбционной влажности и деградацию теплозащиты, обусловленную техническим состоянием конструкции. Настоящая работа посвящена разработке и верификации уточнённой расчётной модели, интегрирующей оба указанных механизма.

Анализ публикаций. Проблематика расхождения расчётного и фактического термического сопротивления ограждающих конструкций отражена в значительном числе работ. Исследования Тарасюка П.Н., Трубаева П.А. и соавторов [11] показали, что для многослойных конструкций с минераловатым утеплителем, монтируемым непосредственно в процессе строительства, фактическое R составляет лишь 70–80 % от расчётного. При этом для однородных конструкций (кирпичная кладка, заводские панели) значительных расхождений не выявлено.

Добросмыслов С.С. [1] с соавторами численно исследовали взаимосвязь между реальным температурно-влажностным режимом и теплопроводностью слоёв ограждающей конструкции. Показано, что в диапазоне относительной влажности воздуха 20–85 %, характерном для эксплуатируемых зданий, теплофизические свойства материалов существенно изменяются, и использование одного значения λ для всей конструкции методологически неоправданно [6–9]. Для более точной оценки R авторы рекомендуют применять зависимость теплопроводности от сорбционной влажности.

Шкильнюк М.А. и Баденко В.Л. [2-3] в серии работ экспериментально подтвердили, что продолжительность эксплуатации и техническое состояние конструкций – наиболее существенный фактор деградации их теплозащитных свойств, обуславливающий прогрессирующее снижение R в течение жизненного цикла здания. Выделен «критический порог», соответствующий 3-й категории технического состояния и выше, при котором отклонения становятся практически значимыми.

Вместе с тем в рамках ни одной из рассмотренных работ не предложена интегральная расчётная модель, совместно учитывающая оба механизма снижения R: влажностную деградацию теплопроводности и эксплуатационный износ. Ликвидация данного методологического пробела составляет цель настоящей работы.

Цель и постановка задачи. Цель исследования – разработка уточнённой расчётной модели прогнозирования фактического термического сопротивления многослойных ограждающих конструкций с учётом:

– реального распределения сорбционной влажности по слоям конструкции;



– зависимости коэффициента теплопроводности от сорбционной влажности;
– категории технического состояния конструкции как интегрального показателя физического износа.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- формализация математической задачи стационарного тепло- и влагопереноса через многослойную ограждающую конструкцию;
- получение аналитических зависимостей $\lambda(w)$ и $w(\phi)$ из экспериментальных данных;
- введение корректирующего коэффициента снижения теплозащиты k_{TC} по категориям технического состояния на основе натуральных измерений;
- верификация модели по результатам инструментальных измерений на реальных объектах.

Методология. В установленном режиме, при допущении о стационарном тепловлажном поле, процессы переноса тепла и влаги в пористом слое ограждающей конструкции описываются связанной системой уравнений:

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) = 0 \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial e}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial e}{\partial y} \right) = 0 \\ E = 1,84 \times 10^{-3} \exp \left(-\frac{5330}{T} \right) \\ \varphi = \frac{e}{E} \times 100\%; \lambda = f_1(w); w = f_2(\varphi) \end{cases} \quad (1)$$

где λ – коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°C); T – температура, К; μ – коэффициент паропроницаемости, кг/(с·м·Па); E – давление насыщенного водяного пара, Па; ϕ – относительная влажность воздуха, %; e – парциальное давление водяного пара, Па; w – сорбционная влажность, %.

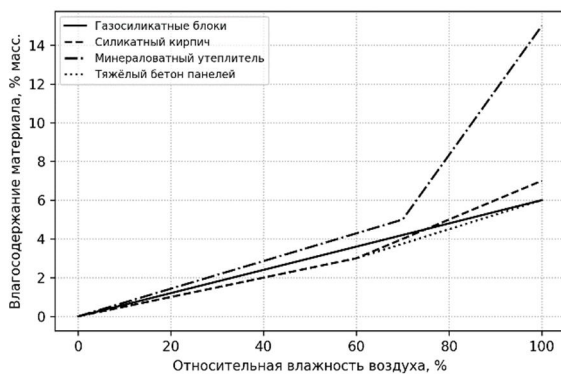


Рис. 1. Зависимость влагосодержания материалов от относительной влажности воздуха

Зависимость $w = f_2(\phi)$ (изотерма сорбции) и $\lambda = f_1(w)$ принимаются на основе экспериментальных данных Фраунгоферского института строительной физики для конкретных материалов. Результиру-

ющий коэффициент теплопроводности i -го слоя в реальных условиях обозначается λ_i^{real} . [6]

Таблица 1 – Тепло-влажностные характеристики материалов наружных ограждающих конструкций

Материал	Плотность, кг/м ³	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{0,0}$ Вт/(м·°C)	Коэффициент теплопроводности $\lambda_{0,2}$ Вт/(м·°C)	Условное влагосодержание $w_{0,0}$, %	Условное влагосодержание $w_{0,2}$, %
Газосиликатные блоки	500	0,12	0,14	3	5
Силикатный кирпич	1800	0,70	0,81	3	6
Минераловатный утеплитель	40	0,038	0,044	5	10
Тяжёлый бетон панелей	2400	1,69	1,75	3	6

Сопротивление теплопередаче материалов наружных ограждающих конструкций в реальных условиях эксплуатации определяется по формуле:

$$R = \frac{\Delta T}{q}, \quad (2)$$

где ΔT – разность температур на поверхностях конструкции, °C; q – плотность теплового потока, Вт/м².

Для многослойной конструкции полное термическое сопротивление, вычисленное через реальные λ_i^{real} , равно [10]:

$$R_{real} = \frac{1}{\alpha_n} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i^{real}} + \frac{1}{\alpha_w}, \quad (3)$$

где δ_i – толщина i -го слоя, м; α_n и α_w – коэффициенты теплообмена на внутренней и наружной поверхностях, Вт/(м²·°C) [10].

Относительное отклонение от нормативной величины оценивается по выражению:

$$\Delta = \frac{|R_{real} - R_{A,B}|}{R_{A,B}} \times 100\%, \quad (4)$$

где $R_{A,B}$ – сопротивление теплопередаче, рассчитанное по условиям эксплуатации А или Б согласно СП 50.13330.2012 [10].

На основе результатов натуральных измерений, выполненных на 30 объектах в г. Могилёве, г. Бельничах и г. Круглом [2-3], получены средние значения отношения фактического термического сопротивления к расчётному для каждой категории технического состояния. Введён безразмерный корректирующий коэффициент k_{TC} , определяемый как [2-3]:

$$k_{TC} = \frac{R_{fact}}{R_{real}}, \quad (5)$$

Значения k_{TC} по результатам натуральных измерений систематизированы для нормируемых типов ограждений [2-3].

Объединяя влажностную деградацию теплопроводности и физический износ, прогнозные значе-



ние фактического термического сопротивления записывается в виде:

$$R_{\text{prog}} = k_{\text{ТС}} \cdot \left(\frac{1}{\alpha_{\text{в}}} + \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i^{\text{real}}(w_i)} + \frac{1}{\alpha_{\text{н}}} \right), \quad (6)$$

где w_i – сорбционная влажность i -го слоя, определяемая из решения системы (1); $k_{\text{ТС}}$ – коэффициент технического состояния для соответствующего типа конструкции [2-3].

На основе обобщения данных по 40 ограждающим конструкциям различных типов (газосиликатные блоки с вентилируемым фасадом и минераловатным утеплителем, силикатный кирпич с минераловатным утеплителем и вентилируемым фасадом, однослойные панельные плиты толщиной 400 мм, кирпичная кладка толщиной 510 мм) установлено, что усреднённый коэффициент понижения термического сопротивления $k_{\text{ТС}}$ зависит преимущественно от категории технического состояния, а не от типа конструкции. Для совокупности обследованных объектов получены значения: $k_{\text{ТС}} = 0,98$ для 2-й категории, $k_{\text{ТС}} = 0,75$ для 3-й категории и $k_{\text{ТС}} = 0,62$ для 4-й категории.

Верификация модели. Для верификации рассматривается многослойная наружная стеновая конструкция, распространённая в застройке г. Могилёва: силикатный кирпич 500 мм + минераловатный утеплитель 100 мм + вентилируемый фасад. Расчётные граничные условия соответствуют наружным климатическим параметрам г. Могилёва для самого холодного месяца (январь) по СП 131.13330.2012: $T_{\text{н}} = -21$ °С, $e_{\text{н}} = 140$ Па; внутренние параметры: $T_{\text{в}} = 21$ °С, $e_{\text{в}} = 1367$ Па [6; 10].

Таблица 2 – Исходные данные для верификации расчётной модели

Конструкция	$T_{\text{в}}$, °С	$T_{\text{н}}$, °С	$e_{\text{в}}$, Па	$e_{\text{н}}$, Па	$R_{\text{расч}}$, м ² ·°С/Вт
Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	21	-21	1367	140	2.87
Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	21	-21	1367	140	6.44
Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	21	-21	1367	140	2.87

Тепловлажностные характеристики принимаются согласно СП 50.13330.2012 [10] и экспериментальным данным: для силикатного кирпича $\lambda_{\text{д}} = 0,7$ Вт/(м·°С), $\lambda_{\text{б}} = 0,81$ Вт/(м·°С); для минераловатного утеплителя $\lambda_{\text{д}} = 0,038$ Вт/(м·°С), $\lambda_{\text{б}} = 0,044$ Вт/(м·°С).

Решение системы (1) численным методом даёт распределение температуры и относительной влажности по толщине конструкции. С учётом изо-

терм сорбции получены реальные значения теплопроводности для каждого слоя. Для граничных условий г. Могилёва характерно, что зона с относительной влажностью воздуха 60–75 % соответствует утеплителю, что приводит к повышению $\lambda_{\text{реал}}$ минватного слоя на 8–12 % по сравнению с условием А.

Сравнение с натурными измерениями. Для пятиэтажных жилых домов г. Могилёва (строительство 2001–2010 гг.) с конструкцией «силикатный кирпич 500 мм + минвата 100 мм + вентилируемый фасад», категории технического состояния 2–3, натурные измерения дали $R_{\text{факт}} = 2,20...2,71$ м²·°С/Вт при расчётном значении $R_{\text{рас}} = 2,87$ м²·°С/Вт [2, 3]. Прогнозные значения по формуле (6) составили $R_{\text{prog}} = 1,98...2,30$ м²·°С/Вт. Расхождение модели с натурными измерениями не превысило 9 %, что свидетельствует об удовлетворительной точности предложенного подхода [2, 3].

Таблица 3 – Сравнение расчётных, прогнозных и фактических значений термического сопротивления ограждающих конструкций

Конструкция	Категория ТС	$R_{\text{рас}}$	$R_{\text{факт}}$	R_{prog}	$R_{\text{факт}}/R_{\text{рас}}$, %	$R_{\text{факт}}/R_{\text{prog}}$
Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	4	2.87	1.91	1.78	66.55	1.07
Газосиликатные блоки, вентилируемый фасад с минераловатным утеплителем, 670 мм	4	6.44	4.10	3.99	63.66	1.03
Силикатный кирпич 500 мм, минераловатный утеплитель 100 мм, вентилируемый фасад	2	2.87	2.46	2.41	85.71	1.02
Однослойные панельные плиты, 400 мм.	2	0.93	0.91	0.89	97.85	1.02
Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	2	0.83	0.82	0.80	98.80	1.02
Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	3	0.83	0.61	0.62	73.49	0.98
Кладка из силикатного кирпича, 510 мм	4	0.83	0.52	0.51	62.65	1.01
Однослойные панельные плиты, 400 мм.	3	0.93	0.74	0.70	79.57	1.06

Обсуждение. Полученные результаты подтверждают вывод о том, что применение единых условий эксплуатации А или Б ко всем слоям многослойной ограждающей конструкции является методологически некорректным и приводит к систематической переоценке термического сопротивления на 1–16 %. Реальная сорбционная влажность утеплителя существенно превышает значения, заложенные в расчёт по условию А, особенно при эксплуатации в климатических условиях с высокой относительной влажностью воздуха в переходный период.

Вместе с тем влажностный фактор является лишь одной из составляющих общей деградации теп-



лозащитных свойств. Экспериментально доказано, что снижение $R_{\text{факт}}$ относительно проектного на 6–41 % в первую очередь детерминировано конструктивным исполнением и техническим состоянием ограждений, а не типом применяемых материалов [2-3]. Разработанный корректирующий коэффициент $k_{\text{ТС}}$ позволяет учесть этот фактор количественно [2-3].

Принципиальной новизной предложенной двухфакторной модели является возможность прогнозирования $R_{\text{факт}}$ на любом этапе жизненного цикла здания при известной категории технического состояния конструкции [2-3]. Это создаёт предпосылки для интеграции модели в системы технического мониторинга и BIM-модели объектов жилищного строительства [2-3].

Следует отметить ограничения предложенного подхода. Значения $k_{\text{ТС}}$, полученные по результатам натурных измерений, относятся к конкретным типам конструкций в климатических условиях Могилёвской области. Их корректность для других регионов или конструктивных решений требует дополнительной верификации [2-3]. Кроме того, модель не учитывает тепловые мосты и теплопроводные включения (анкерные крепления, стальные связи), влияние которых на приведённое термическое сопротивление может быть существенным.

Выводы:

1. Применение единых условий эксплуатации А или Б ко всем слоям многослойной наружной ограждающей конструкции является некорректным: реальная влажность каждого слоя определяется его расположением в конструкции, температурным полем и парциальным давлением водяного пара, а отклонение расчётного R от реального достигает 1–16 %.

2. Прогрессирующая деградация теплозащитных свойств в процессе эксплуатации детерминирована преимущественно конструктивным решением и физическим износом. Введение корректирующего коэффициента технического состояния $k_{\text{ТС}}$ позволяет прогнозировать снижение R для конструкций 2-й категории – на 11–12 %, 3-й категории – на 24–25 %, 4-й категории – на 34–39 % относительно расчётного нормативного значения.

3. Предложенная двухфакторная прогнозная модель, совместно учитывающая реальную зависимость $\lambda(w)$ и коэффициент $k_{\text{ТС}}$, демонстрирует расхождение с результатами натурных измерений для рассматриваемой выборки ограждающих конструкций не превышает 10 %, при среднем отклонении не более 5 %, что подтверждает её практическую применимость для целей проектирования и технического мониторинга.

4. Критическим порогом деградации теплозащитных свойств является 3-я категория технического состояния, при переходе в которую совокупное снижение $R_{\text{прог}}$ относительно нормативного превышает 25% и конструкция перестаёт соответствовать актуальным нормативным требованиям теплозащиты.

Библиографический список

1. Добросмыслов С. С., Пылаева М. М., Огорельцева Н. В., Перькова М. А. Изменение теплофизических характеристик наружных ограждающих конструкций в условиях реального температурно-влажностного режима // Известия Казанского гос. архитектур.-строит. ун-та. – 2018. – № 3(45). – С. 114–120.
2. Баденко В. Л., Шкильнюк М. А. Оценка теплотехнических характеристик многослойных ограждающих конструкций на основе их технического состояния // Экономика строительства и природопользования. – 2025. – № 1(94). – С. 50–57.
3. Баденко В. Л., Шкильнюк М. А. Оценка теплотехнических характеристик ограждающих конструкций на основе их технического состояния // Строительный и технологический журнал. – 2025. – № 3(96). – С. 38–46.
4. Гагарин В. Г., Козлов В. В. Математическая модель и инженерный метод расчёта влажностного состояния ограждающих конструкций // Academia. Архитектура и строительство. – 2006. – № 2. – С. 60–63.
5. Киселёв И. Я. Влияние равновесной сорбционной влажности строительных материалов на сопротивление теплопередаче наружных ограждающих конструкций зданий // Жилищное строительство. – 2013. – № 6. – С. 39–40.
6. Krus M., Künzel H. M. Effect of moisture content on heat and moisture transport and storage properties of thermal insulation materials // Energy and Buildings. – 2012. – Vol. 52. – P. 122–131.
7. Zhang L., Chen J. Comprehensive correction of thermal conductivity of moist porous building materials with static moisture distribution and moisture transfer // Energy. – 2019. – Vol. 176. – P. 103–118.
8. Kim S., Olofsson T., Nair G., Rohdin P. Monitoring and thermal performance evaluation of two building envelope solutions in an apartment building // E3S Web of Conferences. – 2020. – Vol. 172. – Art. 25002. [8]
9. Elsharkawy H., El Dankoli I. Building Envelope Thermal Defects in Existing and Under-Construction Housing in the UAE; Infrared Thermography Diagnosis and Qualitative Impacts Analysis // Sustainability. – 2021. – Vol. 13, No. 4. – Art. 2230.
10. СП 50.13330.2012 [10]. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – М.: Минрегион России, 2012. – 96 с.
11. Тарасюк П. Н., Трубаев П. А., Ващенко Д. А., Радченко В. В. Анализ термического сопротивления ограждающих конструкций различного типа по результатам инструментальных измерений // Вестник Белгородского гос. технол. ун-та им. В. Г. Шухова. – 2015. – № 2. – С. 152–156.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 11.05.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 11.05.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.

Научная статья

УДК 624.4

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела, 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения, 2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818_2026_2_160

УЧЕТ СДВИГОВЫХ И ПРОДОЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ В НЕЛИНЕЙНЫХ РАСЧЕТАХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК И РАМ ВАРИАЦИОННО-РАЗНОСТНЫМ МЕТОДОМ

© Авторы, 2026

БОСАКОВ Сергей Викторович

доктор технических наук, профессор

Белорусский национальный технический университет

(Беларусь, Минск, e-mail: sevibo@yahoo.com)

КОЗУНОВА Оксана Васильевна

кандидат технических наук, доцент, докторант,

заведующий кафедрой «Строительство и эксплуатация зданий и сооружений»

ФСН филиала БНТУ

Белорусский национальный технический университет

(Беларусь, Минск, e-mail: kozunova@gmail.com)

Аннотация. В работе предлагается использовать вариационно-разностный подход для нелинейного расчета железобетонных балок и рам. При этом используется нелинейная зависимость «Жесткость – кривизна». Для статически определимых балок и рам после получения упругого решения требуется одна итерация для нахождения перемещений. Для статически неопределимых балок и рам необходимо выполнить несколько итераций по корректировке жесткостей на каждой итерации. Приведены графики окончательных перемещений в статически определимой балке раме, изгибающих моментов в статически неопределимой балке и перемещений – статически неопределимой в раме.

Ключевые слова: балка; рама; вариационно-разностный подход; зависимость «жесткость-кривизна»

Для цитирования: Босаков С.В., Козунова О.В. Учет сдвиговых и продольных деформаций в нелинейных расчетах железобетонных балок и рам вариационно-разностным методом // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 160-164. doi:10.51608/26867818_2026_2_160.

Original article

ACCOUNTING FOR SHEAR AND LONGITUDINAL DEFORMATIONS IN NONLINEAR CALCULATIONS OF REINFORCED CONCRETE BEAMS AND FRAMES USING THE VARIATION-DIFFERENCE METHOD

© The Author(s) 2026

BOSAKOV Sergey Viktorovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Belarusian National Technical University

(Belarus, Minsk)

KOZUNOVA Oksana Vasilyevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department

Belarusian National Technical University

(Belarus, Minsk)

Abstract. The work proposes to use a variation-difference approach for the nonlinear calculation of reinforced concrete beams and frames. In this case, the nonlinear relationship “Rigidity - curvature” is used. For statically determinate beams and frames, once the elastic solution is obtained, one iteration is required to find the displacements. For statically indeterminate beams and frames, it is necessary to perform several iterations of adjusting the stiffnesses at each iteration. The paper presents the graphs of final displacements in a statically indeterminate beam frame, bending moments in a statically indeterminate beam and displacements in a statically indeterminate frame.

Keywords: beam; frame; variation-difference approach; “stiffness-curvature” relationship

For citation: Bosakov S.V., Kozunova O.V. Accounting for shear and longitudinal deformations in nonlinear calculations of reinforced concrete beams and frames using the variation-difference method // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 160-164. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_160.

В современных нормативных документах РФ по расчету железобетонных конструкций по предельным состояниям заложена нелинейная связь между деформациями и напряжениями [1]. Ниже излагается подход, позволяющий определять усилия и перемещения в железобетонных балках и рамах на произвольную внешнюю нагрузку с учетом нелинейности. Подход основан на свойстве полной потенциальной энергии стержневой системы и действующей на нее нагрузке в состоянии статического равновесия иметь минимум [2]. Предварительно рассмотрим некоторые вспомогательные соотношения, которые будут нужны при получении численных результатов.

1. Энергия деформаций изгиба, сдвига и сжатия-растяжения в стержне в конечно-разностной форме (Рис.1.1)

В дальнейших расчетах при вычислении энергии деформаций стержня будем учитывать изгибные, сдвиговые и продольные деформации [3] в следующей форме

$$\Phi = \frac{EJ}{2} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{2v_2}{\Delta x^2} \right)^2 + \sum_{k=2}^7 \left(\frac{v_{k+1} - 2v_k + v_{k-1}}{\Delta x^2} \right)^2 + \sum_{k=9}^{14} \left(\frac{v_{k+1} - 2v_k + v_{k-1}}{\Delta x^2} \right)^2 \right) \Delta x + \frac{\mu EJ^2}{2 GA} \sum_{k=2}^{14} \frac{(y_{k-2} - 2y_{k-1} + 2y_{k+1} - y_{k+2})^2}{4\Delta x^5} \quad (1.1)$$

где y_i, u_i – вертикальное (прогиб) и горизонтальное перемещения узла i стержня; $\mu = 1.2$ для прямоугольного сечения; EJ_k, GA_k, EA_k – изгибная, сдвиговая и продольная жесткости сечения k стержня; $0, n+1$ – законтурные точки. Значения перемещений в них определяются из граничных условий.

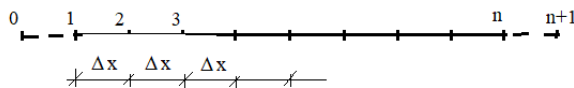
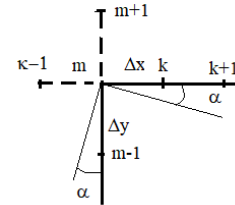


Рис. 1.1. Разбивка стержня на участки

2. Свойство жесткого узла стержневой системы

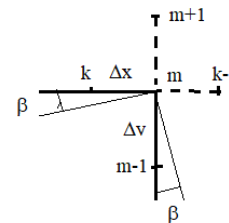
При определении значений перемещений в законтурных точках рамы используется свойство жесткого узла стержневой системы при его повороте [4] (Рис. 2.1, Рис. 2.2).



$$\frac{v_k - v_m}{\Delta x} = \frac{u_{m+1} - u_{m-1}}{2\Delta y}$$

$$\frac{u_{m-1} - u_m}{\Delta y} = \frac{v_k - v_{k-1}}{2\Delta x}$$

Рис. 2.1 Угловая деформация левого жесткого узла



$$\frac{u_{m-1} - u_m}{\Delta y} = \frac{v_{k-1} - v_k}{2\Delta x}$$

$$\frac{v_m - v_k}{\Delta x} = \frac{u_{m+1} - u_{m-1}}{2\Delta y}$$

Рис. 2.2 Угловая деформация правого жесткого узла

3. Зависимость «жесткость-кривизна» для армированного железобетонного сечения прямоугольной формы

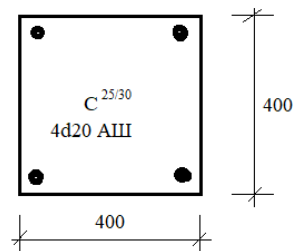
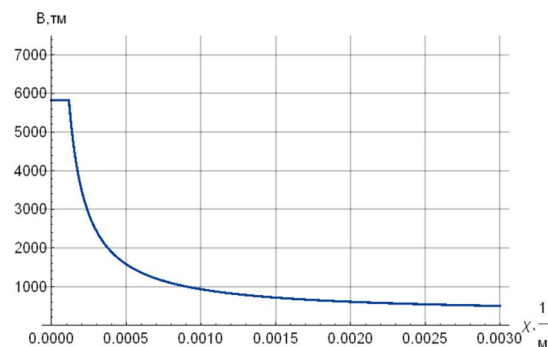


Рис. 3.1. Зависимость «жесткость – кривизна» для квадратного сечения



На рисунках 3.1, 3.2, 3.3 приводятся графики зависимости «жесткость-кривизна» для различно армированных трех сечений прямоугольной формы, используемых ниже при проведении численных исследований.

Такие графики впервые были использованы в монографии [5] и позднее, в работе [6].

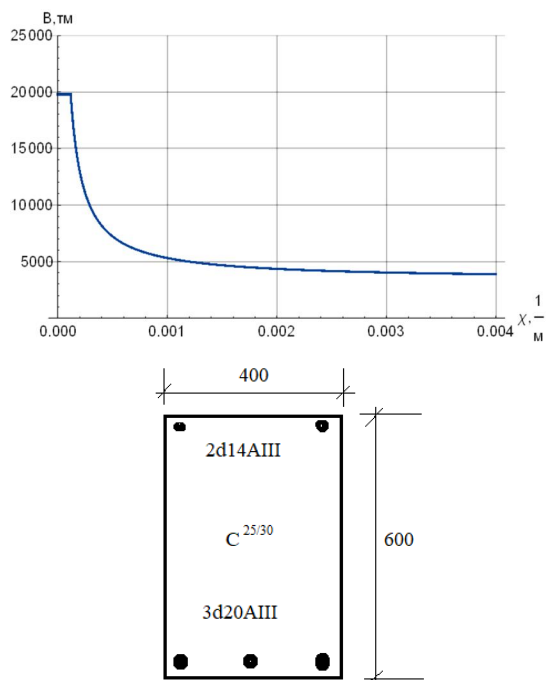


Рис. 3.2. Зависимость «жесткость – кривизна» для прямоугольного сечения

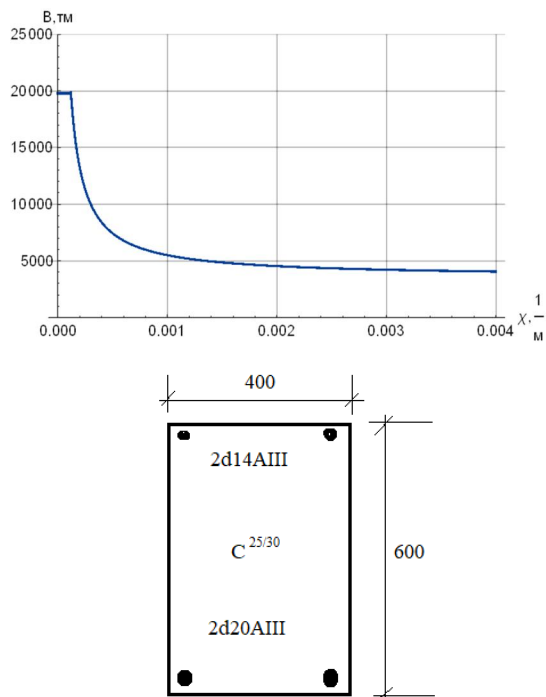


Рис. 3.3. Зависимость «жесткость – кривизна» для прямоугольного сечения

4. Расчет статически определимых балок и рам

При расчете статически определимых балок и рам после упругого расчета выполняется одна итерация для определения перемещений.

После упругого расчета по упругим перемещениям определяются кривизны, по которым находят изгибные жесткости и полная энергия балки и действующей нагрузки. Это позволяет определить окончательные перемещения.

Рассмотрим пример (Рис. 4.1) нелинейного расчета балки под действием равномерно распределенной нагрузки. Граничные условия следующие

$$v_1 = v_{15} = 0; \quad v_0 = v_2; \quad v_{16} = -v_{14}.$$

Функционал полной энергии для рассматриваемой балки в упругой постановке имеет вид

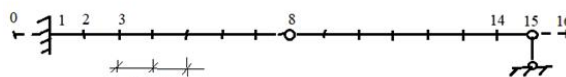


Рис. 4.1. Статически определимая балка

$$\Phi = \frac{EJ}{2} \left(\frac{1}{2} \left(\frac{2v_2}{\Delta x^2} \right)^2 + \sum_{k=2}^7 \left(\frac{v_{k+1} - 2v_k + v_{k-1}}{\Delta x^2} \right)^2 + \sum_{k=9}^{14} \left(\frac{v_{k+1} - 2v_k + v_{k-1}}{\Delta x^2} \right)^2 \right) \Delta x +$$

$$\frac{\mu}{2} EJ(1+\nu) h^2 \sum_{k=2}^{14} \frac{(y_{k-2} - 2y_{k-1} + 2y_{k+1} - y_{k+2})^2}{4\Delta x^5} - q\Delta x \sum_{k=2}^{14} y_k \quad (4.1)$$

где h – высота поперечного сечения балки; $\nu = 0.17$ – коэффициент Пуассона бетона.

После уточнения жесткостей выражение для полной энергии становится

$$\Phi_1 = \frac{1}{2} \left(\frac{B_1}{2} \left(\frac{2v_2}{\Delta x^2} \right)^2 + \sum_{k=2}^7 B_k \left(\frac{v_{k+1} - 2v_k + v_{k-1}}{\Delta x^2} \right)^2 + \sum_{k=9}^{14} B_k \left(\frac{v_{k+1} - 2v_k + v_{k-1}}{\Delta x^2} \right)^2 \right) \Delta x + \quad (4.2)$$

$$\frac{\mu}{2} (1+\nu) h^2 \sum_{k=2}^{14} B_k \frac{(y_{k-2} - 2y_{k-1} + 2y_{k+1} - y_{k+2})^2}{4\Delta x^5} - q\Delta x \sum_{k=2}^{14} y_k$$

В (4.1) постоянная жесткость EJ по рис. заменена на постоянную для каждого k -го участка жесткость B_k .

На рис. 4.2. показаны графики вертикальных перемещений балки при упругом и неупругом расчетах при данных сечения балки по рис. 3.2 и $q = 0.25$ т/м, $\Delta x = 1$ м.

Теперь рассмотрим расчет статически определимой рамы с опорами на одном уровне (Рис. 4.3) под действием сосредоточенной силы.

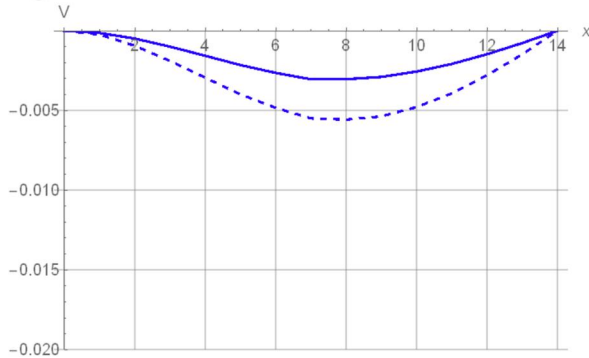


Рис. 4.2. Графики вертикальных перемещений балки при упругом расчете (сплошная линия) и нелинейном

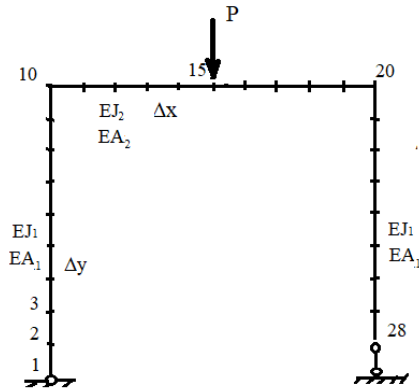


Рис. 4.3. Железобетонная рама

Функционал полной энергии в упругой стадии представляется в виде

$$\Phi = \frac{EJ_1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{u_2 - 2u_1 + u_0}{\Delta y^2} \right)^2 + \sum_{k=2}^8 \left(\frac{u_{k+1} - 2u_k + u_{k-1}}{\Delta y^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{2 \frac{\Delta y}{\Delta x} (V_{10} - V_9) - U_8 - 2U_9 + U_8}{\Delta y^2} \right)^2 \right] \Delta y + \\ \frac{EJ_2}{2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{V_{10} - 2V_9 - 2 \frac{\Delta x}{\Delta y} (U_8 - U_9) - V_{10}}{\Delta x^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \sum_{k=11}^{14} \left(\frac{V_{k+1} - 2V_k + V_{k-1}}{\Delta y^2} \right)^2 + \sum_{k=16}^{19} \left(\frac{V_{k+1} - 2V_k + V_{k-1}}{\Delta y^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \frac{1}{2} \left(\frac{-2 \frac{\Delta x}{\Delta y} (U_{20} - U_{19}) - V_{18} - 2V_{19} + V_{20}}{\Delta x^2} \right)^2 \right] \Delta x +$$

$$+ \frac{EJ_1}{2} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{2 \frac{\Delta y}{\Delta x} (V_{18} - V_{19}) - U_{20} - 2U_{19} + U_{20}}{\Delta y^2} \right)^2 + \right. \\ \left. + \sum_{k=21}^{27} \left(\frac{u_{k+1} - 2u_k + u_{k-1}}{\Delta y^2} \right)^2 \right] \\ + \frac{\mu(1+\nu)}{4\Delta x^5} h^2 \sum_{m=10}^{19} EJ_2 (V_{m-2} - 2V_{m-1} + 2V_{m+1} - V_{m+2})^2 \times \\ \times \frac{EA_1}{2} \sum_{k=1}^9 \left(\frac{V_{k+1} - V_k}{\Delta y} \right)^2 \Delta y + \frac{EA_2}{2} \sum_{k=10}^{19} \left(\frac{U_{k+1} - U_k}{\Delta x} \right)^2 \Delta x + \\ + \frac{EA_1}{2} \sum_{k=20}^{27} \left(\frac{V_k - V_{k+1}}{\Delta y} \right)^2 \Delta y \quad (4.3)$$

При этом заметим, что в стойках рамы возникают только сжимающие продольные силы и поэтому трещинообразование в стойках не влияет на продольную жесткость. После упругого расчета уточняются изгибные жесткости каждого участка в соответствии с рис. 3.1 и 3.2 и выполняется окончательный расчет. На рис. 4.4 приведены графики вертикальных перемещений горизонтального ригеля при $\Delta x = 1$ м; $\Delta y = 0.5$ м; $P = 30$ кН.

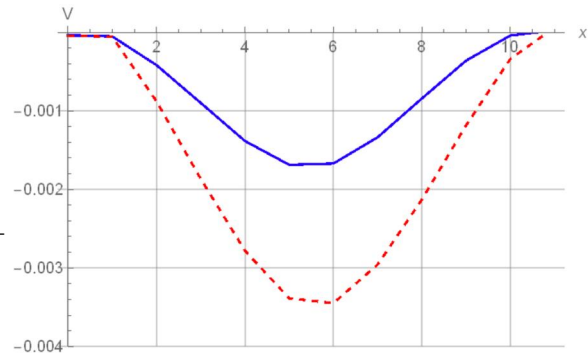


Рис. 4.4. Графики вертикальных перемещений (м) ригеля при упругом и нелинейном (пунктир) расчетах

5. Расчет статически неопределимых балок и рам

Рассмотрим статически неопределимую балку (Рис. 5.1) под действием равномерно-распределенной нагрузки $q = 20$ кН/м с различными жесткостями рис. 3.2в сжатой и растянутой зонах. Выполняя описанные выше действия после двух итераций получаем решение, показанное на рис. 5.2.

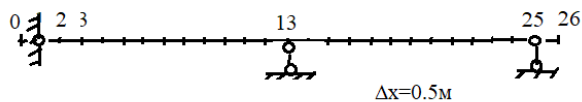


Рис. 5.1. Статически неопределимая балка

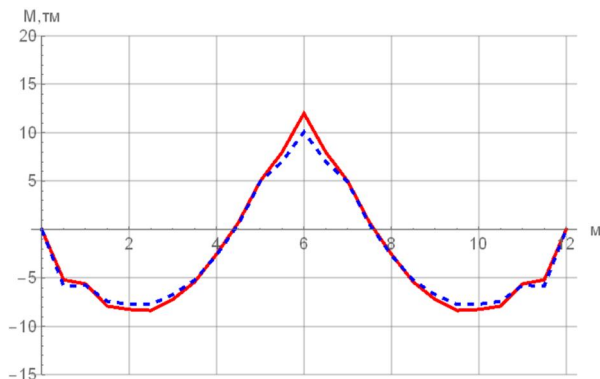


Рис. 5.2. Эпюры изгибающих моментов в неразрезной балке (пунктир – после двух итераций)

Рассмотрим статически неопределимую железобетонную раму (Рис. 5.3) под действием сосредоточенной силы, приложенной вертикально в точке 13. В ригеле и стойках при этой нагрузках возникают только продольные сжимающие силы.

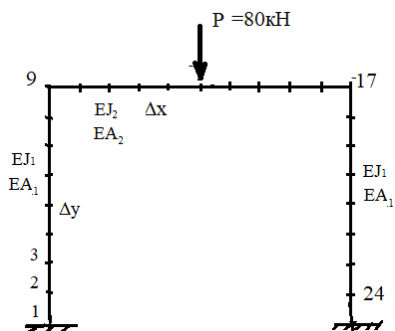


Рис. 5.3. Статически неопределимая железобетонная рама

На рис. 5.4 приведены эпюры прогибов ригеля после двух итераций (пунктир – вторая итерация).



Рис. 5.4. Эпюры прогибов в ригеле железобетонной рамы (м) после двух итераций (красный цвет)

Выводы. Предложен нелинейный расчет вариационно-разностным способом изгибаемых железобетонных статически определимых и неопределимых балок и рам. Подход основан на использовании зависимости «Жесткость-кривизна», которая использовалась школой проф. Соломина В.И. Предлагаемый подход выгодно отличается от МКЭ, так как приводит к ленточной матрице разрешающей системы уравнений с большим количеством нулей и не требует построения матриц жесткости. Авторы считают, что теоретические исследования в этом научном направлении следует продолжить.

Библиографический список

1. СНБ 5.03.01-02. Бетонные и железобетонные конструкции. Министерство архитектуры и строительства РБ. Мн., 2003. 139с.
2. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М., Высшая школа, 1990. 400с.
3. Коллатц Л. Задачи на собственные значения. М., Наука, ФМ. 1968. 503с.
4. Рабинович И.М. Курс строительной механики. Часть II. Госстройиздат, М., 1954. 544с.
5. Соломин В.И., Шматков С.Б. Методы расчета и оптимальное проектирование железобетонных фундаментных конструкций. М., Стройиздат, 1986. 208с.
6. Козунова О.В. Нелинейный расчет железобетонной балки на упругом основании с помощью зависимости «жесткость-кривизна» // Строительная механика и расчет сооружений. №1(300). 2022. С.37-46.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 11.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 11.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.



Научная статья

УДК 624.04

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела, 2.1.9 Строительная механика

doi:10.51608/26867818_2026_2_165

ОПТИМИЗАЦИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФЕРМ, РЕГУЛИРУЕМОГО СПОСОБОМ ИЗМЕНЕНИЯ НАЧАЛЬНЫХ ДЛИН ЭЛЕМЕНТОВ

© Авторы, 2026
SPIN: 8587-9490

СЕБЕШЕВ Владимир Григорьевич

почетный член РААСН, кандидат технических наук, профессор

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

(Россия, Новосибирск, e-mail: sebeshev@sibstrin.ru)

ЗЕЛЕНЕЦКИЙ Сергей Александрович

студент Института строительства

Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)

(Россия, Новосибирск, e-mail: s.zelenetskij@sibstrin.ru)

Аннотация. Представлены разработанные методика и алгоритм расчета регулирования продольных сил в стержнях линейно деформируемых ферм с использованием регуляторов кинематического типа – смещений внутренних связей, реализуемых как начальные вариации длин элементов. Решена задача определения значений регуляторов, которые обеспечивают результат регулирования напряженного состояния, оптимальный по критерию минимума среднеквадратического значения усилий. Применение предложенной методики показано на тестовых моделях – фермах, в которых осуществляется кинематическое регулирование с получением в итоге значений усилий, удовлетворяющих принятому критерию оптимальности.

Ключевые слова: ферма; регулирование силовых факторов; смещения внутренних связей; оптимизация; целевая функция; критерий оптимальности

Для цитирования: Себешев В.Г., Зеленецкий С.А. Оптимизация напряженного состояния ферм, регулируемого способом изменения начальных длин элементов // Эксперт: теория и практика. 2026. № 2 (33). С. 165-164. doi:10.51608/26867818_2026_2_165.

Original article

OPTIMIZING THE STRESS STATE OF TRUSSES REGULATED BY VARIING THE INITIAL LENGTHS OF THE ELEMENTS

© The Author(s) 2026

SEBESHEV Vladimir Grigor'evich

Honorary Member of the RAACS, Candidate of Technical Sciences, Professor
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)
(Russia, Novosibirsk)

ZELENETSKY Sergey Alexandrovich

Student of the Building Institute
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)
(Russia, Novosibirsk)

Abstract. A developed methodology and algorithm for calculating longitudinal force regulation in the members of linearly deformable trusses are presented. The kinematic regulators – displacements of internal connections implemented as initial variations in element lengths are utilizing. The problem of determining the regulator values that ensure optimal results of stress-state regulation based on the criterion of minimum root-mean-square force values is solved. The application of the proposed



methodology is demonstrated using test models – trusses in which kinematic regulation is implemented, yielding force values that satisfy the accepted optimality criteria.

Keywords: truss, regulation of force factors, displacements of internal connections, optimization, objective function, optimality criteria

For citation: Sebeshev V.G., Zelenetsky S.A. Optimizing the stress state of trusses regulated by varying the initial lengths of the elements // Expert: theory and practice. 2026. № 2 (33). Pp. 165-164. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2026_2_165.

Введение. При проектировании строительных систем (сооружений, конструкций) наряду с задачей обеспечения надежности актуальным является вопрос улучшения их эксплуатационных характеристик с возможной экономией ресурсов (материалоемкости, стоимости и др.). Последнее достигается зачастую использованием аналогий, предыдущего опыта, перерасчетами и т.п. Для исключения субъективизма целесообразно применение апробированного подхода – целенаправленного воздействия на напряженно-деформированное состояние (НДС) системы, т.е. регулирования, теория расчета которого представлена в ряде публикаций, в частности, [1–5], а инженерные приложения – в [6–10]. В данной работе задача расчета регулирования рассматривается как оптимизационная с использованием критерия минимума среднеквадратического значения усилий во всех стержнях фермы при использовании в качестве регуляторов начальных отклонений от проектных длин элементов в идеализированной по геометрии схеме фермы.

Цель исследования – разработка методики и расчетного аппарата решения задач оптимизации усилий в стержнях ферм как линейно деформируемых систем с регуляторами кинематического типа – смещениями внутренних связей, по критерию минимума среднеквадратического значения усилий.

Задачи:

- получение в аналитической форме зависимостей для определения значений регуляторов, отвечающих принятому критерию оптимальности;
- решение тестовых задач для верификации предлагаемой методики расчета оптимизации.

Постановка задачи, методы и решение

В соответствии с терминологией и понятиями теории регулирования НДС конструкций, продольные силы в стержнях фермы рассматриваются как регулируемые параметры, а в качестве регуляторов принимаются начальные изменения длин элементов, которые по кинематическому смыслу являются смещениями внутренних связей. Для определения значений регуляторов, обеспечивающих наилучшее в определенном смысле (по некоторому критерию) распределение усилий в системе используется аппарат теории оптимального проектирования конструк-

ций [11–13], предусматривающий отыскание точки минимума (в других постановках – максимума) целевой функции, математически выражающей принятый критерий качества системы, в пространстве варьируемых параметров, в роли которых в рассматриваемой задаче оптимального регулирования напряженного состояния ферм выступают обозначенные выше регуляторы.

Целевой функцией, как правило, является некоторая характеристика конструкции или ее состояния, зависящая от параметров НДС. Задача оптимизации считается многоцелевой при использовании нескольких целевых функций, соответствующих различным критериям качества, в противном случае – как одноцелевая. Далее представлено решение одноцелевой (монокритериальной) задачи минимизации среднеквадратического значения всех усилий в системе:

$$f = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=0}^n N_i^2} \rightarrow \min, \quad (1)$$

где f – целевая функция; N_i – продольное усилие в i -ом элементе (стержне) фермы; n – количество элементов.

«Отрегулированные» усилия N_i в (1) зависят от заданной нагрузки и регуляторов, в качестве которых могут выбираться как некоторые из стержней фермы** (при этом $n_v < n$, здесь n_v – число регуляторов), так и – в предельном случае – все элементы ($n_v = n$). Но при регулировании силовых факторов должно выполняться условие $n_v \leq n_{st}$ (n_{st} – степень статической неопределимости системы) [2], поэтому если назначить $n \geq n_v > n_{st}$, то решение задачи – не единственное, и необходим выбор по дополнительному ограничению, в частности – по (1).

При использовании метода сил с основными неизвестными $X_1, \dots, X_{n_{st}}$ (n_{st} – степень статической неопределимости) для получения уравнений состояния статически неопределимой фермы усилие в некотором i -м стержне находится как [9]

$$N_i = \sum_k^{n_{st}} \sum_j^{n_v} \sum_m^{n_{st}} N_{i,X_m} a_{mk} R_{j,X_k} V_j + N_{i(V=0)}, \quad (2)$$

где N_{i,X_m} – продольная сила в i -м элементе (стержне) основной системы метода сил (ОСМС) от единичного основного неизвестного $X_m = 1$; R_{j,X_k} – продольная сила j -го стержня (актуатора), изменение начальной длины которого принято за

* Более точно (по общетехнической терминологии и в соответствии с [1]): стержни выступают как *актуаторы*,

реализующие регуляторы – их начальные укорочения/удлинения.



регулятор, от действия $X_k = 1$ в ОСМС; V_j – значение j -го регулятора; a_{mk} – элемент обратной матрицы внешней упругой податливости (δ^{-1}) ОСМС; $N_{i,(V=0)}$ – продольная сила в i -м элементе от действия заданной нагрузки (при отсутствии регулирования).

Заметим, что в такой постановке задачи, когда в качестве регуляторов назначаются изменения начальных длин всех элементов фермы, матрица R_X оказывается тождественной N_X .

Обозначим $\sum_j^n R_{j,Xk} V_j = Y_k$, тогда из (2):

$$N_i = \sum_k^n \sum_m^{n_{st}} N_{i,Xm} a_{mk} Y_k + N_{i(V=0)}. \quad (3)$$

Компоненты вектора Y_k можно интерпретировать как суммарный вклад всех регуляторов в перемещение по направлению основного неизвестного X_k .

Минимум или максимум функции f находится по критерию Сильвестра:

– необходимое условие:
 $\text{grad}(f(Y_0)) = 0 \Rightarrow \frac{\partial f}{\partial Y_u} = 0, u = \overline{1, n}; \quad (4)$

– достаточное условие (с использованием собственных значений λ_i матрицы $Q (Q_{lu} = \frac{\partial^2 f(x_0)}{\partial Y_l \partial Y_u})$):

- 1) $\lambda_i > 0$, тогда матрица Q – положительно определенная, Y_0 – точка минимума;
- 2) $\lambda_i < 0$ – матрица Q – отрицательно определенная, Y_0 – точка максимума.

Рассматриваемая целевая функция соответствует первому случаю достаточного условия. Из необходимого условия экстремума (4), подставив (3) в (1), получим:

$$\sum_i^n \sum_k^{n_{st}} \sum_l^{n_{st}} \sum_m^{n_{st}} a_{um} N_{i,Xm} N_{i,Xl} a_{lk} Y_k = - \sum_i^n \sum_m^{n_{st}} a_{um} N_{i,Xm} N_{i(V=0)}. \quad (5)$$

Выражение из уравнения (5) неизвестного Y_k является решением задачи оптимизации, в матричной записи оно будет иметь вид:

$$R_X V = -\delta(N_X^T N_X)^{-1} N_X^T N_{(V=0)}. \quad (6)$$

Поскольку матрица R_X в общем случае не является квадратной (количество ее строк меньше количества столбцов на величину, равную разности между числом элементов n конструкции и ее степенью статической неопределенности n_{st}), соответствующая система уравнений оказывается неопределенной. Следовательно, существует бесконечное число комбинаций значений регуляторов, при которых достигается минимум целевой функции, но все они, очевидно, должны подчиняться решению задачи оптимизации (6).

Подставив результат из уравнения (6) в (2), получим вектор регулируемых параметров

(продольных сил во всех стержнях фермы), при которых возможен минимум среднеквадратического значения усилий:

$$N = -N_X(N_X^T N_X)^{-1} N_X^T N_{(V=0)} + N_{(V=0)}. \quad (7)$$

Матрица $N_X(N_X^T N_X)^{-1} N_X^T$ – это проекционная матрица, она проецирует вектор $N_{(V=0)}$ размерности n в подпространство, размерность которого равна рангу n_{st} матрицы N_X .

Вектор N является единственным решением, это значит, что произвольное задание требуемых значений усилий в элементах фермы, описываемое условиями регулирования [9], окажется несовместимым с достижением минимума среднеквадратического значения всех усилий, и решение станет невозможным. Для получения корректного результата эти условия (ограничения) необходимо явно включить в постановку задачи оптимизации. В этом случае найденный минимум называется условным, он всегда больше минимума целевой функции, если таргетируемое значение усилия некоторого i -го элемента не равно i -й компоненте вектора N .

Примеры расчета, результаты, обсуждение

Задача 1: выполнить оптимизацию регулирования усилий в стержнях статически неопределимой фермы (рисунок 1, а) из условия минимума целевой функции (1).

Стержни фермы геометрически образуют «египетские треугольники»: $L_1 : L_5 : L_6 = 4 : 3 : 5$ ($L_1 = L_2 = L_3 = L_4 = L$). Жесткости сечений элементов – одинаковые: $EA_i = EA$ ($i = \overline{1, 13}$); жесткости упругих опорных связей: $c_1 = c_2 = EA/(10L)$; $c_3 = EA/(15L)$.

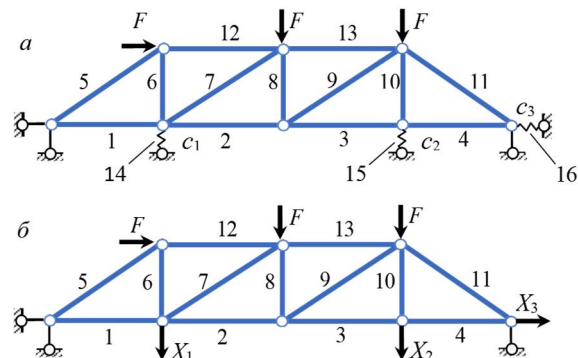


Рис. 1. Расчетная схема фермы (а) и основная система метода сил (б)

Опорные связи можно заменить на эквивалентные элементы фермы под номерами 14, 15, 16. Продольные силы в этих стержнях, согласно условию задачи, не учитываются в среднеквадратическом значении усилий (1). Регуляторы, соответствующие элементам 14, 15, 16, являются смещениями внешних связей, в отличие от остальных – внутренних.



Матрица внешней упругой податливости ОСМС (рисунок 1, б):

$$\delta = \frac{L}{EA} \begin{pmatrix} 16,184 & 3,184 & 2,333 \\ 3,184 & 16,559 & 3,000 \\ 2,333 & 3,000 & 19,000 \end{pmatrix}.$$

Матрица усилий N_x в элементах ОСМС от единичных X и вектор продольных сил от заданной нагрузки $N_{(V=0)}$ (при равных нулю значениях регуляторов):

$$N_x = \begin{pmatrix} 1,000 & 0,333 & 1,000 \\ 0,667 & 0,667 & 1,000 \\ 0,333 & 1,000 & 1,000 \\ 0,333 & 1,000 & 1,000 \\ -1,250 & -0,417 & 0,000 \\ 0,750 & 0,250 & 0,000 \\ 0,467 & -0,417 & 0,000 \\ -0,250 & 0,250 & 0,000 \\ 0,416 & -0,416 & 0,000 \\ 0,000 & 1,000 & 0,000 \\ -0,416 & -1,250 & 0,000 \\ -1,000 & -0,333 & 0,000 \\ -0,667 & -0,667 & 0,000 \\ 1,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 1,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 1,000 \end{pmatrix};$$

$$N_{(V=0)} = F \cdot \begin{pmatrix} 0,754 \\ 1,474 \\ 0,860 \\ 0,860 \\ -0,021 \\ 0,012 \\ -0,900 \\ -0,460 \\ 0,767 \\ -0,618 \\ -1,404 \\ -1,017 \\ -1,737 \\ -0,527 \\ -0,618 \\ -0,263 \end{pmatrix}.$$

Значение целевой функции при отсутствии регулирования $f_{(V=0)} = 0,97000 F$.

Решение задачи по уравнению (6) дает:

$$N_x^T V = \frac{FL}{EA} \begin{pmatrix} -8,462 \\ -8,412 \\ -8,248 \end{pmatrix}.$$

Вектор продольных сил с учетом действия регуляторов, соответствующий минимуму целевой функции, по формуле (7):

$$N = F \cdot (-0,099 \ 0,631 \ 0,028 \ 0,028 \ 0,637 \ -0,382 \rightarrow \\ -0,913 \ -0,452 \ 0,754 \ -0,989 \ -0,772 \ -0,490 \rightarrow \\ -1,221 \ -0,930 \ -0,989 \ -0,589)^T.$$

Одним из бесконечного множества комбинаций регуляторов может служить вариант, в котором ненулевыми будут только три регулятора V_1, V_2, V_3 (их актуаторы – стержни 1, 5, 9), тогда решение задачи примет вид:

$$V = \frac{FL}{EA} \begin{pmatrix} -8,248 \\ 3,526 \\ 10,065 \end{pmatrix}.$$

В результате оптимизации достигнуто минимальное значение целевой функции $f = 0,67211 F$, что на 30,71% меньше, чем в случае нерегулируемого и неоптимизированного состояния конструкции.

Для сравнения – другой вариант: при тех же подлежащих определению V_1, V_2, V_3 назначаются начальные укорочения стержней 11, 12, 13 равные $FL/(EA)$ (таргетируемые ненулевые регуляторы), остальные (кроме искомым V_1, V_2, V_3) – равные нулю. В этом случае получаются новые значения регуляторов:

$$V = \frac{FL}{EA} \begin{pmatrix} -8,248 \\ 6,126 \\ 12,865 \end{pmatrix},$$

но минимум целевой функции (1) не изменяется.

При некоторых комбинациях геометрических, жесткостных и структурных параметров фермы и соответствующей схеме нагрузки может оказаться, что система находится изначально в оптимальном (по определенному критерию) напряженном состоянии, что делает бесполезными попытки его улучшения регулированием. Такие ситуации не всегда очевидны. Примером является ферма, представленная на рисунке 2, а. Она может быть частью (половиной) симметричной системы. Все стержни конструкции имеют равные длины и жесткости сечений ($L_1 = L_2 = \dots = L_{15} = L$; $EA_1 = EA_2 = \dots = EA_{15} = EA$).

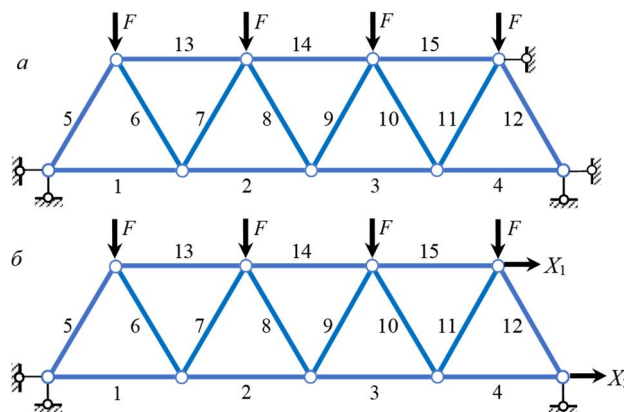


Рис. 2. Расчетная схема дважды статически неопределимой фермы (а), основная система метода сил (б)

Задача 2: доказать нецелесообразность применения регулирования для оптимизации распределения усилий в ферме (рисунок 2, а) по критерию (1).

Матрица внешней упругой податливости ОСМС (рисунок 2, б):

$$\delta = \frac{L}{EA} \begin{pmatrix} 2,688 & 2,000 \\ 2,000 & 4,000 \end{pmatrix}.$$



Продольные силы в элементах ОСМС от единичных основных неизвестных (матрица N_x) и вектор усилий от действия нагрузок (при значениях регуляторов равных нулю):

$$N_x = \begin{pmatrix} 0,875 & 1,000 \\ 0,625 & 1,000 \\ 0,375 & 1,000 \\ 0,125 & 1,000 \\ 0,250 & 0,000 \\ -0,250 & 0,000 \\ 0,250 & 0,000 \\ -0,250 & 0,000 \\ 0,250 & 0,000 \\ -0,250 & 0,000 \\ 0,250 & 0,000 \\ -0,250 & 0,000 \\ 0,250 & 0,000 \\ 0,500 & 0,000 \\ 0,750 & 0,000 \end{pmatrix};$$

$$N_{(v=0)} = F \cdot \begin{pmatrix} 0,192 \\ 2,373 \\ 1,091 \\ -3,655 \\ -5,646 \\ 2,182 \\ -2,182 \\ -1,282 \\ 1,282 \\ -4,746 \\ 4,746 \\ -8,210 \\ -3,914 \\ -4,365 \\ -1,351 \end{pmatrix}.$$

Решение уравнения (6) дает

$$N_x^T V = \begin{pmatrix} 0,000 \\ 0,000 \end{pmatrix},$$

тогда по формуле (7) вектор продольных сил с учетом действия регуляторов, соответствующий минимуму целевой функции, оказывается равным вектору усилий от заданной нагрузки:

$$N = N_{(v=0)}. \quad (8)$$

Полученный результат свидетельствует о взаимной компенсации действий регуляторов (8), что эквивалентно их суммарному вкладу равному нулю, то есть фактическому отсутствию регулирования. Вследствие этого оптимизация регулирования не имеет смысла. Данный результат в рассматриваемой задаче обусловлен тем, что все элементы фермы имеют одинаковые характеристики $L_i / (EA_i)$. Приведем доказательство этого эффекта.

Чтобы ОСМС была эквивалентна рассчитываемой статически неопределимой системе, перемещения по направлениям удаляемых лишних связей должны быть равными нулю. При заданных $\frac{L_1}{EA_1} = \frac{L_2}{EA_2} = \dots = \frac{L_n}{EA_n} = \frac{L}{EA}$ получаем

$$\Delta_i = \sum_{k=1}^n N_{i,xk} N_{k(v=0)} \cdot \frac{L_k}{EA_k} = \frac{L}{EA} \sum_{k=1}^n N_{i,xk} N_{k(v=0)} = 0. \quad (10)$$

Из уравнения (10) следует:

$$\sum_{k=1}^n N_{i,xk} N_{k(v=0)} = 0 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow R_x V = -\delta(N_x^T N_x)^{-1} N_x^T N_{(v=0)} = 0 -$$

с учетом этого, согласно (7), вектор требований к численным значениям регулируемых параметров, при которых возможен минимум среднеквадратического значения усилий, в матричной форме примет вид:

$$N = -N_x (N_x^T N_x)^{-1} N_x^T N_{(v=0)} + N_{(v=0)} = N_{(v=0)},$$

что и требовалось доказать.

Следует отметить, что данный результат при оговоренных условиях тождественен оптимизации по критерию минимума потенциальной энергии деформации [14].

Заключение. Разработана методика и расчетный аппарат решения задач оптимизации усилий в стержнях ферм как линейно деформируемых систем с использованием смещений внутренних связей в качестве регуляторов.

Библиографический список

1. Абовский, Н. П. Управляемые конструкции / Н.П. Абовский. – Красноярск: КрасГАСА, 1998. 433 с.
2. Себешев, В. Г. Особенности работы статически неопределимых систем и регулирование усилий в конструкциях / В.Г. Себешев. – Новосибирск: НГАСУ (Сибстрин), 2009. 164 с.
3. Абовский, Н. П. Регулирование. Синтез. Оптимизация. Избранные задачи по строительной механике и теории упругости: Учеб. пособие для вузов. Под ред. Н.П. Абовского. 3-е изд., перераб. и доп. / Н.П. Абовский, Л.В. Енджиевский, В.И. Савченков, А.П. Деруга, И.И. Гетц. – М.: Стройиздат, 1993. 456 с.
4. Палагушкин, В. И. Регулирование напряженно-деформированного состояния строительных конструкций при статических нагрузках. В сб.: Актуальные вопросы строительства: взгляд в будущее. Сб. научн. ст. по материалам II Всерос. научно-практ. конф. / В.И. Палагушкин, В.Е. Зобнина. – Красноярск, 2023. С. 302–304.
5. Sebeshev, V. G., Zhananov A.A., Shestakov A.A. On the properties of the failure probability function in reliability analysis of constructions and structures with regulation of their stress-strain state. В сборнике: IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. International Conference Safety Problems of Civil Engineering Critical Infrastructures. 2020. С. 012005.
6. Бирюлев, В. В. Металлические неразрезные конструкции с регулированием уровня опор / В.В. Бирюлев. – М.: Стройиздат, 1984. 89 с.
7. Холопов, И. С. Оптимальное проектирование стержневых металлических конструкций с использованием модулярных форм / И.С. Холопов // Металлические конструкции. 2008. Т. 14. № 4. С. 285-297.



8. Должиков, В. Н. Экспериментальные исследования влияния смещений в узловых соединениях элементов на напряженно-деформированное состояние натурального фрагмента фермы / В.Н. Должиков, Е.Н. Должикова // Известия вузов. Строительство, 2024. №4. С. 34–43.
9. Зеленецкий, С. А. Регулирование напряженно-деформированного состояния ферм способом изменения начальных длин элементов / С.А. Зеленецкий // Сб. научн. ст. ГрГУ. Гродно, 2024. С. 49–53.
10. Чирцова, Х. Ю. Вероятностные расчеты регулирования усилий и оценка надежности ферм с кинематическим преднапряжением / Х.Ю. Чирцова, В.Г. Себешев. – В сб.: Интеллектуальный потенциал Сибири. Сб. научн. тр. 2018. С. 196–197.
11. Majid K.I. Optimum design of structures. London, Newnes–Bullerworths. 1974. 237 p.
12. Рейтман, М. И. Методы оптимального проектирования деформируемых тел / М.И. Рейтман, Г.С. Шапиро. – М.: Наука, 1976. 266 с.
13. Малков, В. П. Оптимизация упругих систем / В.П. Малков, А.Г. Угодчиков. – М.: Наука, 1981. 288 с.
14. Холопов, И. С. Вариационный принцип в проблеме оптимального проектирования / И.С. Холопов // Вестник НИЦ Строительство. 2010. № 2. С. 114-125.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 11.04.2026; одобрена после рецензирования 17.06.2026; принята к публикации 17.06.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 11.04.2026; approved after reviewing 17.06.2026; accepted for publication 17.06.2026.

РЕЦЕНЗИИ

Рецензия

УДК 69

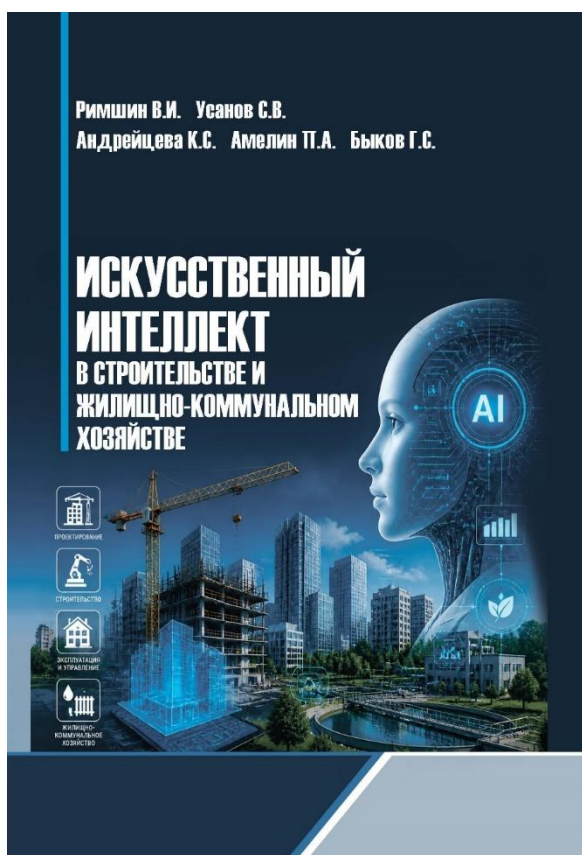
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

ОТЗЫВ НА УЧЕБНИК «ИСКУССТВЕННЫЙ ИНТЕЛЛЕКТ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ И ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОМ ХОЗЯЙСТВЕ»

©Автор, 2026
SPIN: 5618-7033

ТЕЛИЧЕНКО Валерий Иванович
первый вице-президент РААСН,
академик РААСН, д.т.н., профессор; президент
РААСН; МГСУ (Россия, Москва)

Авторы: Римшин Владимир Иванович - Член - корр. РААСН, д.т.н., профессор, Усанов Сергей Владимирович - к.т.н., доцент, Андрейцева Кристина Сергеевна - к.т.н., ст.н.с., Амелии Павел Андреевич - к.т.н. доцент, Быков Григорий Сергеевич – ведущий научный сотрудник.



Представленный на рецензию учебник состоит из одиннадцати глав, списка литературы, а также девяти приложений общим объемом 523 страниц машинописного текста.

В учебнике с современных позиций раскрываются вопросы применения искусственного интеллекта в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве в соответствии с решениями декабрьского 2025 года Госсовета Российской Федерации по внедрению искусственного интеллекта в строительном и коммунальном комплексе нашей страны.

Поэтому можно констатировать, что вопросы, рассматриваемые в учебнике авторами, являются актуальными и своевременными.

Особенно стоит отметить положительный фактор использование и анализ международного опыта в области искусственного интеллекта.

Отдельная глава в учебнике посвящена применению искусственного интеллекта для проектирования, расчётов, обследования и контроля технического состояния строительных конструкций, который позволяет рассмотреть строительный процесс как продолжающуюся стадию непрерывного процесса от начала изысканий, предпроектных разработок, строительства и далее всего жизненного цикла, включая стадию предлагаемых к утилизации строительных объектов.

С современных позиций авторами предлагаются методы компьютерного зрения для строительных конструкций, которые позволяют увеличить производительность труда в строительной и коммунальной отраслях. Перейти от рутинного и многочисленного ручного труда к использованию механизированных машинных комплексов.

Считаю особенным и полезным рассмотрением в учебнике отдельной главой применение робототехники для строительных конструкций. Данный вопрос аргументировано и убедительно рассмотрен авторами в предлагаемых к рецензированию материалах учебника. В этой же главе авторами предлагаются перспективы использования робототехники в решении прикладных задач и далее в машинных методах расчёта.

В итоге авторами представлены достаточно интересные и полезные приложения, позволяющие читателю более полно освоить текст учебника и пополнить свой творческий и технический кругозор.

Учебник «Искусственный интеллект в строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве» рекомендуется к опубликованию в открытой печати.



REVIEW ON THE TEXTBOOK
"ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN CONSTRUCTION AND HOUSING AND COMMUNAL SERVICES"

©The Author(s) 2026

TELICHENKO Valery Ivanovich

First Vice-President of the RAACS, Academician of the RAACS,
Doctor of Sciences (Technical), Professor; President
RAACS; MGSU (Russia, Moscow)

It can be stated that the issues addressed in the textbook by the authors are relevant and timely.

Especially worth noting as the positive factors are the use and analysis of international expertise in the sphere of artificial intelligence.

In my opinion, the consideration of robotics applications for building structures as a separate chapter is special and useful in the textbook. This question has been argued and convincingly considered by the authors in the textbook's proposed reviews. In the same chapter, the authors propose the prospects of using robotics in solving applied problems and further in machine calculation methods.

As a result, the authors present quite interesting and useful applications that allow the reader to more fully master the text of the textbook and enrich their creative and technical outlook.

The textbook "Artificial Intelligence in Construction and Housing and Communal Services" is recommended for publication in open print.

УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

АВТОРАМ

Автор(ы), самостоятельно направляя научную статью, принимают на себя следующие обязательства: передают редакции сетевого издания «ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» неисключительные права на использование научной статьи путем ее воспроизведения, использования научной статьи целиком или фрагментарно в сочетании с любым текстом, фотографиями или рисунками, в том числе, путем размещения полнотекстовых сетевых версий номеров на интернет-сайте издания.

Автор(ы) несет (ут) ответственность за неправомерное использование в научной статье объектов интеллектуальной собственности, объектов авторского права или «ноу-хау» в полном объеме в соответствии с действующим законодательством РФ.

Автор(ы) подтверждает (ют), что, направляемая статья публикуется впервые и не направлена в другое издание.

Автор(ы) согласен (ы) на обработку в соответствии со ст.6 Федерального закона «О персональных данных» от 27.07.2006 г. №152-ФЗ своих персональных данных, а именно: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, место(а) работы и/или обучения, контактная информация по месту работы и/или обучения, в целях опубликования представленной статьи в сетевом издании.

Автор(ы) подтверждает (ют), что направляемая научная статья не содержит сведений или информации с ограниченным доступом и для ее публикации не требуется разрешение Минобрнауки или других министерств и ведомств.

Автор(ы) научной статьи ознакомлен (ы) и согласен (ы) со следующими условиями:

- авторские права на научную статью принадлежат автору(ам) данной статьи;
- авторские права на номер сетевого издания (в целом) принадлежат учредителю сетевого издания;
- редакция сетевого издания имеет право предоставлять материалы научных статей в российские и зарубежные организации, обеспечивающие индексы научного цитирования;
- редакция сетевого издания имеет право производить необходимые уточнения и сокращения;
- вознаграждение (гонорар) за опубликованные статьи не выплачивается, материалы научных статей, направляемые в редакцию, авторам не возвращаются.

При этом авторы имеют право использовать все материалы в их последующих публикациях при условии, что будет сделана ссылка на публикацию в нашем сетевом издании.

Если при верстке в **Индизайне** или загрузке в **РИНЦ** (*они видят всё*) у вас в статье будет обнаружено замена однотипных букв из разных алфавитов, вставлены слова в виде формул или применены в словах некорректные символы с целью увеличения оригинальности текста (к сожалению Word и Антиплагиат этого не видят) – статья будет **удалена**, а вся информация будет передана вашей организации.

*Редакция сетевого издания
«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»*



ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ В ЖУРНАЛЕ

«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

(включен в категорию **K2** перечня **ВАК**, пятилетний импакт-фактор в РИНЦ – 0,736)

Сайт: <https://www.expert763.ru/>

Научные специальности:

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.9. – Строительная механика (технические науки);
- 1.1.8. - Механика деформируемого твердого тела (технические и естественные науки);

Размещение статей в сетевом издании платное.

Оплата производится после получения вами **сообщения** о приеме статьи к публикации, после чего автором высылается скриншот или фото оплаты через Сбербанк-онлайн или через другие банки-онлайн на адрес сетевого издания: expert763@mail.ru

Статью высылать по адресу: expert763@mail.ru

Материалы авторов (соавторов) не имеющих персональной регистрации в БД РИНЦ (SPIN-код, AuthorID) редакцией не рассматриваются, за исключением: если соавтором является доктор наук по специальности ВАК сетевого издания «Эксперт: теория и практика».

Редакция вправе отказать в размещении материалов автору, имеющему низкие наукометрические показатели в БД РИНЦ.

Структурные параметры:

Статья обязательно должна иметь элементы, отвечающие следующим параметрам:

1. Метаданные статьи на русском и английском языках (научная специальность, УДК, DOI, название статьи, знак копирайта (авторского права), **все научные идентификаторы автора**, ФИО автора полностью, должность, организация, адрес организации, личная электронная почта, аннотация и ключевые слова) – **не проверяются на антиплагиат.**

2. Тело статьи:

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

(кратко описывается проблема исследования и значение ее решения)

Анализ последних исследований и публикаций, в которых рассматривались аспекты этой проблемы и на которых обосновывается автор; выделение неразрешенных ранее частей общей проблемы.

(указаны общие тенденции в том, что уже было опубликовано, указано на отдельную проблему или на перспективу развития по данной тематике)

Обосновывается актуальность исследования.

(подтверждена актуальность исследования, указано практическое значение статьи и ее вклад в науку)

МЕТОДОЛОГИЯ

Формирование целей статьи.

(указывается цель статьи)

Используемые методы, методики и технологии.

(а) описание методов, которые вы применяли конкретно для статьи, если теоретическая статья, то выбрать один метод и описать его методологию, теорию, историю, конкретно какие принципы этого метода применяли к данному исследованию;



б) описание этапов эксперимента, в) описание участников эксперимента (возраст, пол, вузы и какие площадки были охвачены)

РЕЗУЛЬТАТЫ

Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов.

(а) раскрыто новшество статьи, описаны авторские наблюдения и результаты;

б) представленные результаты соответствуют заявленным целям и задачам статьи;

в) описана идея, концепция, методика, которая нашла применение (конкретика);

г) представлены результаты в виде таблиц и рисунков - названия таблиц и рисунков отвечают содержанию таблиц и рисунков)

ОБСУЖДЕНИЕ

Сравнение полученных результатов с результатами в других исследованиях.

(а) сравнили различные методы, сравнили результаты исследования с аналогичными в других статьях;

б) написали о различиях или сходстве (или и о различиях, и о сходстве);

в) сделали разбор и разъяснение результатов;

г) сделали обобщение и оценку результатов, сделали оценку достоверности полученных результатов;

д) определили место полученных в ходе исследования результатов в структуре известных знаний)

ВЫВОДЫ

Выводы исследования.

(подводится итог статьи, указываются результаты, к которым пришли в результате проведенного исследования)

Перспективы дальнейших изысканий в данном направлении.

(указываются направления, по которым необходимо провести дальнейшие исследования)

3. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (не проверяется на антиплагиат).

(рекомендуется в списке литературы не менее 15 источников, 5 из которых за последние 5 лет (в 2023 году - это статьи 2019-2023 годов).

Технические параметры:

Названия файла:

- Фамилия город (например: **Иваненко Самара**)

Общий объем: 5-9 страниц печатанного текста формата А-4 (до списка литературы).

Стандарты: шрифт Times New Roman, **кегель – 14**, междустрочечный **интервал – 1,5**, абзацный отступ – **1 см** (это сделано для того, чтобы автор точно знал сколько страниц текста у него будет в журнале), все поля – **2 см**, литература – **В ПОРЯДКЕ ПОЯВЛЕНИЯ В ТЕКСТЕ** (желательно не менее 15 наименований, из них 5 (рекомендуется) – за последние 1-5 лет), редактор Word, тип файла – документ **Word 97-2003** (обязательно).

Ключевые слова (не менее 8 слов) и **аннотация** (не менее 150-200 слов) на русском и английском.

Неразрывные пробелы между цифрами, инициалами и фамилией.

Не путать тире (–) и дефис (-).

Формулы необходимо набирать в файле формата **Microsoft Word 2010** (используя опции "Вставка -> Формула"), а потом сохранять в **Word 97-2003**, в таком случае формулы становятся как картинки, размер символа - **10** (обязательно), длина формул не должна превышать **80 мм** (обязательно), латинские символы набираются курсивом, греческие – прямым шрифтом, **КИРИЛЛИЦА НЕ ДОПУСКАЕТСЯ**.

Рисунки, выполненные векторной графикой, должны быть помещены одним объектом или сгруппированы.

Сканированные рисунки исполнять с отдельной возможностью не менее 300 dpi.

Справочная информация:

1. Для определения УДК можно использовать следующие ссылки:

А) <http://teacode.com/online/udc/>



Б) <http://www.naukapro.ru/metod.htm>

2. Для проверки статьи на антиплагиат (проверка обязательна **в системе АнтиплагиатВУЗ** – все остальные дают неверные показатели) ссылка (оригинальность текста статьи должна быть не менее 75%, в тексте статьи должно быть не менее 8000 и не более 40000 знаков без пробелов):

А) <https://www.antiplagiat.ru/> (результаты хранятся у автора и высылаются по запросу редколлегии)

Статьи в обязательном порядке размещаются в системе РИНЦ – российского индекса научного цитирования (elibrary, ссылка: <http://elibrary.ru/titles.asp>), НЭБ КиберЛенинка (ссылка: <https://cyberleninka.ru>) и на сайте журнала.

Сетевое научно-практическое издание

ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА
№ 2 (33) 2026 г.

Главный редактор - Мурашкин Василий Геннадьевич,
доктор технических наук, АНО "ИССТЭ", Тольятти

Scientific and Practical Online Edition

EXPERT: THEORY AND PRACTICE
№ 2 (33) 2026

Editor-in-Chief - Murashkin Vasily Gennadievich,
Doctor of Technical, INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Материалы представлены в авторской редакции
Дизайн обложки: e-mail: anna.sarachai@gmail.com

Подписано для публикации на сайте <http://expert763.ru> 30.06.2026.
Формат 60x84/8. Усл.-печ. л. 20,7.
Электронные текстовые данные (10,2 Мб). Распространяется бесплатно.

Учредитель, издатель и редакция журнала - АНО "ИССТЭ".
445047, Самарская область, г. Тольятти, Южное шоссе, дом 35А, офис 401,
+7(8482) 581090, <http://expert763.ru>, e-mail: expert763@mail.ru.

