

e-ISSN: 2782-7445

p-ISSN: 2686-7818

# ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

2026, №1 (32)

СЕТЕВОЕ  
НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКОЕ  
ИЗДАНИЕ

*Expert:  
theory and practice*

12+

АНО «ИССТЭ»  
Тольятти/Tolyatti



Учредитель

Учредитель: Автономная некоммерческая организация "Институт судебной строительно-технической экспертизы" (АНО "ИССТЭ"), 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 Владислав 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)  
*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 ИССТЭ (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)  
*СОРОЧАЙКИН Андрей Никонович* – заместитель главного редактора, Почетный строитель, кандидат экономических наук, доктор философских наук; директор, профессор кафедры судебной экспертизы, АНО ИССТЭ (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](mailto: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 № ФЦ 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)

*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 Minstroy (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)

*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](mailto: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, Почетный строитель, доктор технических наук, советник РААСН, эксперт, профессор 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

*ГОГИН Александр Александрович* – доктор юридических наук, доцент, профессор кафедры "Гражданское право и процесс", Тольяттинский государственный университет

*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 технического наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций, Оренбургский государственный университет

*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 технического 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 технического 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 Zufарович* – 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 Наишевна* – доктор юридических наук, профессор, заведующий лабораторией правовых проблем недропользования, экологии и топливно-энергетического комплекса, Академия наук Республики Татарстан

*СКОЛУБОВИЧ Юрий Леонидович* – член-корреспондент РААСН, Заслуженный эколог РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор технических наук, профессор, ректор, Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Новосибирск, Россия)

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

*СОЛУЯНОВ Юрий Иванович* – доктор технического наук, профессор, Казанский государственный энергетический университет, президент Ассоциации «Росэлектромонтаж» (Москва)

*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, Expert, Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Advisor to RAACS, Prof. 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., CIRDO 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)

*Alexander A. GOGIN* – Dr. of Law, Associate Professor, Prof. of the Department of Civil Law and Procedure, Togliatti State University (Togliatti, Russia)

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

*Valery A. ERY SHEV* – 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)

*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 Science 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. SALJEVA* – 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)

*Yuri L. SKOLUBOVICH* – Corresponding Member 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)

*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)

*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 70-лЕТИЕМ А.Л. ГЕЛЬФОНД .....	8
---	---

### *ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА*

<b>РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШУМА С УЧЕТОМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И АКУСТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА</b> АНТОНОВ Александр Иванович, ЛЕДЕНЕВ Владимир Иванович, МАТВЕЕВА Ирина Владимировна, МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович .....	10
<b>Влияние отвердителей на свойства эпоксидных композитов</b> БАРКОВСКАЯ Светлана Владимировна .....	19
<b>РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> ИВАНОВ Эрнест Николаевич, ЛАЛИН Владимир Владимирович .....	23
<b>МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА И АРМАТУРНОЙ СТАЛИ</b> ИЛЬИН Николай Алексеевич, ПАНФИЛОВ Денис Александрович, МОРДОВСКИЙ Сергей Сергеевич, ВАСЮЧКИН Герман Романович .....	29
<b>Оценка остаточного ресурса производственных зданий и сооружений на опасных производствах. Проблемы и перспективы</b> КОЛИНИЧЕНКО Анатолий Федорович, ЖАДАНОВ Виктор Иванович, ЛИХНЕНКО Елена Владимировна, АДИГАМОВА Земфира Сакратовна .....	34
<b>СРАВНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОЛЬНОЙ КЕРАМИКИ, ПОЛУЧЕННОЙ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ФОРМОВАНИЯ</b> МАКАРЕНКО Сергей Викторович .....	41
<b>Анализ исследований бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой</b> МЕРКУЛОВ Сергей Иванович, ЖИЛЯЕВ Андрей Александрович, ГОРОХОВ Иван Александрович .....	47
<b>Анализ комплексного влияния поверхностно-активных добавок и глиниста на изменение свойств мелкозернистых бетонов</b> НИЗИНА Татьяна Анатольевна, ВОЛОДИН Владимир Владимирович, КОРОТИН Александр Иванович, МИТРОШИН Игорь Александрович, МАТЯКУБОВ Хасан Бахрамович .....	53
<b>Влияние ионов хлора на химическое сопротивление цементных композитов</b> СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна .....	60

### *МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА*

<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВНЕШНИМ КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ</b> МЕРКУЛОВ Сергей Иванович, ЕСИПОВ Станислав Максимович, КАШУБА Сергей Олегович .....	65
<i>Условия размещения материалов .....</i>	72

# CONTENT

---

## *PERSONALITIES*

CONGRATULATIONS TO A.L. GELFOND ON THE 70TH ANNIVERSARY .....	8
---	---

## *TECHNICAL SCIENCES. BUILDING AND ARCHITECTURE*

<b>CALCULATION OF THE ENERGY PARAMETERS OF NOISE CONSIDERING THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SOUND-ABSORBING MATERIALS AND THE ACOUSTIC POWER OF SOUND SOURCES</b> ANTONOV Aleksandr Ivanovich, LEDENEV Vladimir Ivanovich, MATVEEVA Irina Vladimirovna, MONASTYREV Pavel Vladislavovich .....	10
<b>THE EFFECT OF HARDENERS ON THE PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES</b> BARCOVSKAYA Svetlana Vladimirovna .....	19
<b>REGULATORY BASE DEVELOPMENT TO ENSURE THE RELIABILITY AND DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES</b> IVANOV Ernest Nikolaevich, LALIN Vladimir Vladimirovich .....	23
<b>MATHEMATICAL DESCRIPTION AND CALCULATIONS OF THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE AND REINFORCED STEEL</b> ILYIN Nikolay Alexeyevich, PANFILOV Denis Aleksandrovich, MORDOVSKIY Sergey Sergeevich, VASYUCHKIN German Romanovich .....	29
<b>RESIDUAL LIFE ASSESSMENT OF INDUSTRIAL BUILDINGS AND STRUCTURES IN HAZARDOUS INDUSTRIES. PROBLEMS AND PROSPECTS</b> KOLINICHENKO Anatoly Fedorovich, ZHADANOV Viktor Ivanovich, LIKHNEKO Elena Vladimirovna, ADIGAMOVA Zemfira Sakratovna .....	34
<b>COMPARISON OF THE PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ASH CERAMICS OBTAINED BY DIFFERENT MOLDING METHODS</b> MAKARENKO Sergey Viktorovich .....	41
<b>RESEARCH ANALYSIS OF CONCRETE STRUCTURES WITH COMPOSITE REINFORCEMENT BAR</b> MERKULOV Sergey Ivanovich, ZHILYAYEV Andrey Aleksandrovich, GOROKHOV Ivan Aleksandrovich .....	47
<b>ANALYSIS OF COMPLEX EFFECTS FROM SURFACTANT ADDITIVES AND GLUYENITE ON FINE-GRAINED CONCRETE PROPERTIES</b> NIZINA Tatyana Anatolievna, VOLODIN Vladimir Vladimirovich, KOROTIN Aleksandr Ivanovich, MITROSHIN Igor Aleksandrovich, MATYAKUBOV Hasan Bahramovich .....	53
<b>THE EFFECT OF CHLORINE IONS ON THE CHEMICAL RESISTANCE OF CEMENT COMPOSITES</b> SELYAEV Vladimir Pavlovich, KUPRIYASHKINA Lyudmila Ivanovna .....	60

## *MECHANICS OF A DEFORMABLE SOLID BODY*

<b>EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH EXTERNAL COMPOSITE REINFORCEMENT DURING BENDING WITH TORSION</b> MERKULOV Sergey Ivanovich, ESIPOV Stanislav Maksimovich, KASHUBA Sergey Olegovich .....	65
<i>Conditions for posting materials</i> .....	72

## ПЕРСОНАЛИИ

---

ПОЗДРАВЛЯЕМ С 70-ЛЕТИЕМ А.Л. ГЕЛЬФОНД



5 января свой 70-летний юбилей отметила Анна Лазаревна Гельфонд — академик РААСН, доктор архитектуры, профессор, заведующая кафедрой архитектурного проектирования ННГАСУ и главный архитектор Архитектурной мастерской ННГАСУ, Заслуженный работник культуры РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, член Редакционного совета сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика».

**Поздравляем Анну Лазаревну с замечательной юбилейной датой!**

Анной Лазаревна - известна как выдающийся специалист в области архитектурной науки и педагогической практики, основатель научной школы ННГАСУ по специальности Архитектура.

Благодаря энергии Анны Лазаревны обеспечивается весомый вклад в работу многочисленных профессиональных и общественных структур.



Многогранную деятельность педагога и ученого, общественную деятельность Анна Лазаревна успешно сочетает с архитектурной практикой. Она является автором более 150 проектов и построек.

Плодотворная деятельность А.Л. Гельфонд отмечена высокими профессиональными и государственными наградами и званиями: медалью Академии художеств СССР, медалью «За преданность содружеству зодчих», медалью академика А.В. Иконникова «За выдающийся вклад в архитектурную науку». Анна Лазаревна - Лауреат Премии Нижнего

Новгорода, Лауреат Премии Правительства РФ 2022 года в области образования, Заслуженный работник культуры РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ.

От всего сердца поздравляем Анну Лазаревну с юбилеем. Мы желаем ей долгих лет жизни и успешного воплощения всех её идей и начинаний!

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

#### CONGRATULATIONS TO A. L. GELFOND ON THE 70TH ANNIVERSARY

On January 5, Anna Lazarevna Gelfond celebrated her 70th birthday. She is the academician of RAASN, doctor of architecture, professor, head of the department of architectural design of NNGASU and chief architect of the architectural workshop of NNGASU, honored cultural worker of the Russian Federation, honorary worker of higher professional education of the Russian Federation, member of the Editorial Board of the online scientific-practical publication "Expert: theory and practice".

#### **Congratulations to Anna Lazarevna on a wonderful anniversary!**

Anna Lazarevna is known as an outstanding specialist in the field of architectural science and pedagogical practice, founder of the scientific school NNGASU on the specialty Architecture.

Thanks to the energy of Anna Lazarevna, a significant contribution is made to the work of numerous professional and social entities.

Anna Lazarevna successfully combines the diverse activities of a teacher and scientist with the public activities and with architectural practice. She is the author of more than 150 projects and buildings.

From the bottom of our hearts, we congratulate Anna Lazarevna on her birthday. We wish her many years of life and a successful realization of all her ideas and projects!

*Editorial board, editorial panel, editorial staff  
of the online scientific-practical publication  
"Expert: theory and practice"*

Научная статья

УДК 534.2

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\_1\_10

### РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ШУМА С УЧЕТОМ ЧАСТОТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗВУКОПОГЛОЩАЮЩИХ МАТЕРИАЛОВ И АКУСТИЧЕСКОЙ МОЩНОСТИ ИСТОЧНИКОВ ЗВУКА

© Авторы, 2026

SPIN: 3223-2856

**АНТОНОВ Александр Иванович**

доктор технических наук, ведущий научный сотрудник

*Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН  
(Россия, Москва, e-mail: aiant58@yandex.ru)*

SPIN: 7207-2047

**ЛЕДЕНЕВ Владимир Иванович**

доктор технических наук, профессор кафедры Городское строительство и автомобильные дороги, ведущий научный сотрудник

*Тамбовский государственный технический университет;  
Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН  
(Россия, Тамбов, e-mail: ledvi46@yandex.ru)*

SPIN: 3774-2310

**МАТВЕЕВА Ирина Владимировна**

кандидат технических наук, доцент кафедры Городское строительство и автомобильные дороги

*Тамбовский государственный технический университет  
(Россия, Тамбов, e-mail: times02@yandex.ru)*

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)*

**Аннотация.** В пределах октавных полос частотная характеристика звукопоглощения эффективных шумозащитных материалов может изменяться в широком диапазоне. Это, в частности, относится к звукопоглощающим плитам K-FONIK FIBER. Данное обстоятельство приводит к погрешностям при расчетах октавных уровней шума в помещениях. На точность расчетов оказывают также влияние изменения акустической мощности источников звука в октавной полосе частот. В статье приведена методика расчета уровней шума, учитывающая изменения частотных характеристик звукопоглощающих материалов и акустической мощности источников в октавных полосах звука.

**Ключевые слова:** звуковое поле; расчет шума; октавный коэффициент звукопоглощения материала; акустическая мощность источника; шумозащитные материалы

**Для цитирования:** Расчет энергетических параметров шума с учетом частотных характеристик звукопоглощающих материалов и акустической мощности источников звука / А.И. Антонов, В.И. Леденев, И.В. Матвеева, П.В. Монастырев // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 10-18. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_10.



Original article

**CALCULATION OF THE ENERGY PARAMETERS OF NOISE, TAKING INTO ACCOUNT THE FREQUENCY CHARACTERISTICS OF SOUND-ABSORBING MATERIALS AND THE ACOUSTIC POWER OF SOUND SOURCES**

© Autors, 2026

**ANTONOV Aleksandr Ivanovich**

doctor of technical sciences, Leading Researcher  
*Research Institute of Building Physics RAACS*  
(Russia, Moscow, e-mail: aiant58@yandex.ru)

**LEDENEV Vladimir Ivanovich**

doctor of technical sciences, professor of the department of Urban Construction and Highways, Leading Researcher  
*Tambov State Technical University; Research Institute of Building Physics RAACS*  
(Russia, Tambov, e-mail: ledvi46@yandex.ru)

**MATVEEVA Irina Vladimirovna**

candidate of technical sciences, associate professor of the department of urban development and road  
*Tambov State Technical University*  
(Russia, Tambov, e-mail: times02@yandex.ru)

**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: monasteryrev68@mail.ru)

**Abstract.** Within the octave bands, the frequency response of sound absorption of effective noise protection materials can vary over a wide range. This applies in particular to K-FONIK FIBER sound-absorbing plates. This circumstance leads to errors in calculating octave noise levels in rooms. The accuracy of calculations is also influenced by changes in the acoustic power of sound sources in the octave frequency band. The article presents a method for calculating noise levels that takes into account changes in the frequency characteristics of sound-absorbing materials, and the acoustic power of sources in octave bands of sound.

**Keywords:** sound field; noise calculation; octave coefficient of sound absorption of the material; acoustic power of the source; noise-reducing materials

**For citation:** Calculation of the energy parameters of noise, taking into account the frequency characteristics of sound-absorbing materials and the acoustic power of sound sources / A.I. Antonov, V.I. Ledenev, I.V. Matveeva, P.V. Monastyrev // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 10-18. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_10.

**Введение.** Наиболее полную информацию о звуковом поле предоставляют его частотные характеристики. Для их построения весь диапазон слышимых частот разбивается на заданное количество поддиапазонов, для которых выполняется расчет или измерение уровней звукового давления. Чем меньше ширина частотной полосы анализа, тем больше важной для проектировщика информации содержит частотная характеристика. Таким образом, например, находят участки снижения звукоизоляции ограждений за счет резонансных явлений в конструкциях [1-3]. Построение частотных характеристик звукового поля является трудоемкой процедурой, связанной

как с подготовкой исходных данных, так и с проведением расчетов. В практической деятельности принято частотный спектр необходимых для расчета величин использовать в виде набора дискретных усредненных значений в пределах третьоктавных или октавных частотных полос. Использование конкретных усредненных частотных величин определяется поставленными задачами. Расчет энергетических параметров звуковых полей помещений при проектировании шумозащитных мероприятий чаще всего производят в октавных полосах частот [4-5]. При этом используются усредненные по этим полосам акустические характеристики. К ним относятся



коэффициенты звукопоглощения ограждений и акустическая мощность источников шума. При применении усредненных частотных характеристик звукового поля неизбежно происходит потеря части информации и появление погрешностей в оценке ситуации или в результатах расчета. По этой причине необходимо оценивать возможные погрешности и другие последствия использования усредненных значений.

Усреднения корректны и не приводят к существенным погрешностям, если усредняемые величины в пределах октавной полосы анализа изменяется незначительно [6]. В случае резкого изменения акустических характеристик ограждений или мощности источников шума могут возникнуть погрешности расчетов за счет использования средних или интегральных величин и результаты расчетов могут отличаться от действительных значений в большую или меньшую сторону.

В статье рассматриваются принципы оценки погрешности использования усредненных акустических характеристик и предлагаются методики расчета энергетических параметров звуковых полей помещений с учетом частотного спектра звукопоглощающих свойств ограждений и акустической мощности источников шума.

**Методики усреднения частотных характеристик коэффициентов звукопоглощения материалов и акустической мощности источников звука в октавных полосах частот.** При оценке погрешностей расчетов с применением усредненных частотных характеристик коэффициентов звукопоглощения и акустической мощности источника могут быть использованы методики, при которых производится сравнение уровней звукового давления, полученных для октавной полосы при усредненных частотных характеристиках расчетных параметров, и уровней, определенных с учетом конкретных изменений частотных характеристик в пределах октавы. В последнем случае для получения точного результата необходимо весь диапазон частот в пределах октавы разделить на несколько узких полос, выполнить расчет энергетических параметров звука для каждой полосы и затем определить суммарный уровень звукового давления в октавной полосе частот. Как видно, определение точного результата требует применения ориентированных на компьютерные технологии методов расчета, например, численного статистического энергетического метода [7- 8] и существенных затрат времени.

При расчетах с изменяющимися частотными характеристиками параметров необходимо иметь аналитические выражения для средних величин в пределах октавы. Для их получения возможно использовать средний уровень звукового давления помещения. Такой подход справедлив для соразмерных помещений с диффузными звуковыми полями [9]. Его с определенными допущениями можно

также использовать и в несоразмерных помещениях при оценке среднего по помещению уровня звуковой энергии [10]. Ниже рассмотрены методики получения таких выражений для коэффициентов звукопоглощения и акустической мощности источников.

Средняя плотность отраженной звуковой энергии в октавной полосе анализа в диффузном звуковом поле помещения рассчитывается по формуле

$$\varepsilon = \frac{4\bar{W}(1-\bar{\alpha})}{\alpha cS}, \quad (1)$$

где  $c$  – скорость звука в воздухе;  $S$  – общая площадь ограждающих поверхностей помещения;  $\bar{\alpha}$  – средний коэффициент звукопоглощения помещения;  $\bar{W}$  – средняя акустическая мощность источника.

В выражении (1) средний октавный коэффициент звукопоглощения  $\bar{\alpha}$  и средняя октавная акустическая мощность источника звука  $\bar{W}$  зависят от изменения этих величин в пределах октавы и это может существенно влиять на результаты расчета.

**Методика определения средних величин октавных коэффициентов звукопоглощения.** При наличии частотно зависимой функции коэффициента звукопоглощения  $\alpha_f$  его среднее значение определяется интегрированием

$$\bar{\alpha} = \frac{1}{f_b - f_n} \int_{f_n}^{f_b} \alpha_f df = \int_0^1 \alpha_x dx, \quad (2)$$

где  $f_b, f_n$  – верхняя и нижняя граница диапазона, Гц;  $x$  – аргумент функции в диапазоне  $\{0...1\}$ .

Для упрощения дальнейших записей принят линейный график изменения частоты в пределах октавы

$$f = f_n + (f_b - f_n)x. \quad (3)$$

Большинство эффективных звукопоглощающих материалов имеют акустические характеристики, изменяющиеся в широких пределах, в том числе и в пределах одной октавы [11]. На рис. 1 в качестве примера приведены звукопоглощающие характеристики группы материалов K-FONIK FIBER различной толщины. Далее при анализе из этой группы использован материал K-FONIK FIBER-P30 толщиной 30 мм. Расчеты выполняются в октавной полосе со среднегеометрической частотой  $f_{cp} = 500$  Гц. Диапазон изменений коэффициента звукопоглощения материала в пределах октавной полосы с  $f_{cp} = 500$  Гц составляет от  $\alpha = 0.16$  при  $f = 355$  Гц до  $0.385$  при  $f = 710$  Гц (см. рис. 1, б). Среднее значение коэффициента звукопоглощения в пределах октавной полосы, вычисленное на основе численного интегрирования выражения (2), равно  $\bar{\alpha} = 0.270$ .

На рис. 1 графики коэффициентов звукопоглощения даны при логарифмической шкале абсцисс с основанием 2. Для получения аналитических выражений более удобно использовать график зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты с линейной

шкалой абсцисс (см. рис. 2). В этом случае график зависимости коэффициента звукопоглощения от частоты возможно аппроксимировать показательной функцией

$$\alpha = \alpha_1 \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right)^x, \quad (4)$$

где  $\alpha_2, \alpha_1$  – значения коэффициентов звукопоглощения на границах диапазона;  $x$  – переменная в пределах октавной полосы (см. выражение (3)).

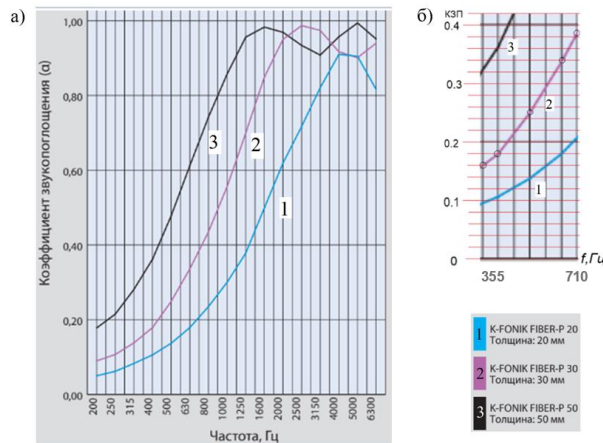


Рис. 1 – Графики изменения коэффициентов звукопоглощения:

а – материалов K-FONIK FIBER; б – материала K-FONIK FIBER-P 30 толщиной 30 мм в пределах октавной полосы со среднегеометрической частотой  $f_{cp} = 500$  Гц

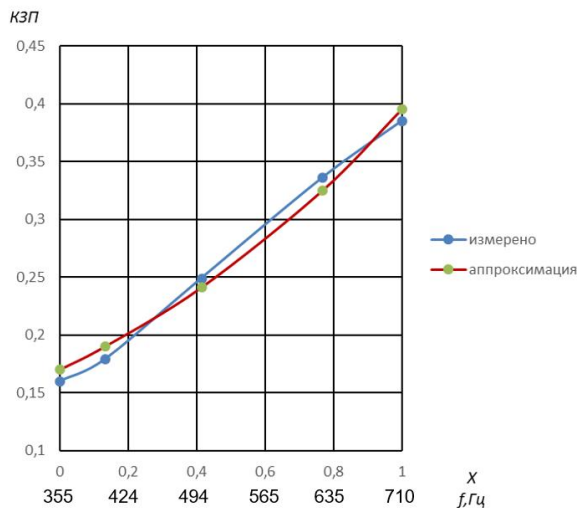


Рис. 2 – График аппроксимации частотной характеристики звукопоглощения в октавной полосе

Для аппроксимации коэффициента звукопоглощения материала в пределах октавной полосы с  $f_{cp} = 500$  Гц использовано выражение (см. рис. 2)

$$\alpha = 0.17 \left( \frac{0.39}{0.17} \right)^x, \quad (5)$$

На основе формул (2) и (4) выражение для среднего коэффициента звукопоглощения материала в пределах октавы имеет вид

$$\bar{\alpha} = \int_0^1 \alpha_1 \left( \frac{\alpha_2}{\alpha_1} \right)^x dx = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\ln(\alpha_2/\alpha_1)}. \quad (6)$$

Для материала K-FONIK FIBER-P 30 средний коэффициент звукопоглощения на основании выражений (5) и (6) равен  $\bar{\alpha} = 0.267$ . Отклонение полученного результата от более точного численного расчета среднего коэффициента звукопоглощения, равного  $\bar{\alpha} = 0.270$ , составляет 1.1 %. Аналогичные значения можно получить и для других октавных полос с другими конкретными изменениями коэффициентов звукопоглощения  $\alpha$  (см. рис. 1).

**Методика определения средних величин акустической октавной мощности источника.** Другой величиной в выражении (1), зависящей от частоты звука, является акустическая мощность источника. Акустическая мощность реальных источников шума может иметь разнообразные формы графиков со значительным изменением величин в диапазоне рассматриваемой полосы частот. В пределах одной октавной полосы уровень акустической мощности может изменяться на 10 и более децибел.

В данном случае принят линейный график изменения уровня акустической мощности источника шума в пределах одной октавной полосы (см. рис. 3). Зависимость акустической мощности от частоты в пределах октавы выразим также как и в (3) через переменную  $x \in \{0 \dots 1\}$

$$L_w = L_{w1} + \Delta L_w x.$$

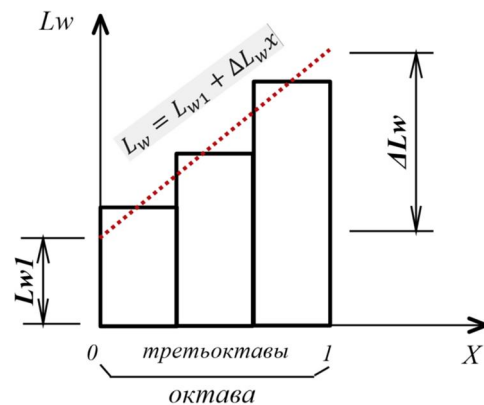


Рис. 3 – Частотная характеристика акустической мощности источника

В этом случае аппроксимационный график акустической мощности описывается показательной функцией

$$W = w_0 10^{0.1(L_{w1} + \Delta L_w x)} \text{ при } \Delta L_w = L_{w2} - L_{w1}, \quad (7)$$

где  $L_{w2}, L_{w1}$  – значения уровней акустической мощности источника звука на границах октавного диапазона частот, дБ;  $w_0$  – пороговое значение акустической мощности;  $\Delta L_w$  – перепад уровня акустической мощности источника шума в пределах октавной по-



лосы частот. При  $\Delta L_w > 0$  акустическая мощность увеличивается с ростом частоты и совпадает с изменениями коэффициента звукопоглощения материала K-FONIK FIBER-P 30. При  $\Delta L_w < 0$  изменения коэффициента звукопоглощения и акустической мощности разнонаправленные.

Общая акустическая мощность источника шума в октавной полосе частот с учетом выражения (7) равна

$$\widetilde{W} = \int_0^1 w_0 10^{0.1(L_{w1} + \Delta L_w x)} dx = \frac{w_0 10^{0.1L_{w1}}}{0.1\Delta L_w \ln(10)} (10^{0.1\Delta L_w} - 1). \quad (8)$$

**Оценка погрешностей частотного усреднения коэффициентов звукопоглощения и акустической мощности в октавной полосе частот.** Как показано ранее, формула (1) для расчета средней плотности звуковой энергии в диффузном звуковом поле содержит ошибки частотного усреднения. Ниже приведена методика расчета погрешностей для соразмерных помещений, в пределах которых плотность отраженной звуковой энергии остается постоянной по всему объему. С учетом зависимости акустической мощности и коэффициента звукопоглощения материалов ограждений от частоты звука в пределах полосы анализа средняя по помещению плотность звуковой энергии должна рассчитываться по выражению

$$\varepsilon = \frac{4}{Sc} \int_0^1 \frac{W(1-\alpha)}{\alpha} dx. \quad (9)$$

Из теории математического анализа известно, что интеграл от произведения функций (см. (9)) в общем случае не равен произведению их интегралов (см. формулы (2) и (8)), то есть

$$\frac{\widetilde{W}(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}} \neq \int_0^1 \frac{W(1-\alpha)}{\alpha} dx. \quad (10)$$

Для устранения погрешности в выражение (9) введен поправочный коэффициент  $D$

$$\varepsilon = \frac{4\widetilde{W}(1-\bar{\alpha})}{\bar{\alpha}Sc} D, \quad (11)$$

который рассчитывается по формуле

$$D = \frac{\bar{\alpha}}{\widetilde{W}(1-\bar{\alpha})} \int_0^1 \frac{W(1-\alpha)}{\alpha} dx. \quad (12)$$

Выражение (12) позволяет в общем случае вычислить поправку  $D$  для различных табличных или аналитических выражений  $W$  и  $\alpha$ .

На основе произведенной аппроксимации значений  $W$  и  $\alpha$  получено выражение для оценки погрешности расчета средней плотности отраженной энергии в соразмерном помещении

$$D = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) - \alpha_2 + \alpha_1} \times \left( \frac{0.1\Delta L_w \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} 10^{0.1\Delta L_w} - 1 \right)}{\alpha_1 \left[ 0.1\Delta L_w - \lg\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) \right] \left( 10^{0.1\Delta L_w} - 1 \right)} - 1 \right). \quad (13)$$

Величина погрешности  $D$  зависит от изменения уровня акустической мощности источника шума  $\Delta L_w$ , а также от величин и изменений коэффициентов звукопоглощения  $\alpha_1$  и  $\alpha_2$  в пределах октавы и может достигать 3...5 дБ.

При постоянстве звукопоглощающих свойств ограждений в пределах октавной полосы частот поправочный коэффициент  $D = 1$  и расчеты средней плотности отраженной звуковой энергии в соразмерных помещениях по выражениям (1) и (9) совпадают.

Представляет интерес анализ выражения (13) при переменных значениях коэффициентов звукопоглощения помещения в пределах октавной полосы частот и постоянной акустической мощности источника шума. В этом случае  $D \neq 1$  и выражение для его определения имеет вид

$$D = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) - \alpha_2 + \alpha_1} \left( \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{\ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) \alpha_2 \alpha_1} - 1 \right). \quad (14)$$

Используя среднее значение коэффициента звукопоглощения, определяемое по формуле (6), выражение (14) может быть записано в более компактной форме

$$D = \frac{\bar{\alpha}}{(1-\bar{\alpha})} \left( \frac{\bar{\alpha}}{\alpha_2 \alpha_1} - 1 \right). \quad (15)$$

Для материала K-FONIK FIBER-P 30 в октаве с  $f = 500$  Гц погрешность использования среднего коэффициента звукопоглощения  $\bar{\alpha} = 0.27$  в выражении (1) вместо интегрального уравнения (9) составит

$$D = \frac{0.27}{(1-0.27)} \left( \frac{0.27}{0.395 \times 0.17} - 1 \right) = 1.12.$$

В данном случае использование коэффициента  $D$  эквивалентно изменению среднего уровня звуковой энергии в помещении на величину  $\Delta L = 10 \lg(D) = 10 \lg(1.12) = 0.48$  дБ.

Вместо поправочного коэффициента  $D$  также можно использовать условное значение коэффициента звукопоглощения  $\hat{\alpha}$ , который будет оказывать

такое же влияние на формирование звукового поля, как и переменный коэффициент звукопоглощения в пределах октавной полосы частот. В результате этого возможно вместо выражений (9) и (11) использовать формулу

$$\varepsilon = \frac{4\tilde{W}(1-\hat{\alpha})}{\hat{\alpha}Sc}. \quad (16)$$

Условный коэффициент звукопоглощения определяется из равенства

$$\frac{1-\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}} = \frac{1}{W} \int_0^1 \frac{W(1-\alpha)}{\alpha} dx. \quad (17)$$

При постоянной в пределах октавной полосы акустической мощности  $W=\text{const}$  источника выражение (17) упрощается

$$\frac{1-\hat{\alpha}}{\hat{\alpha}} = \int_0^1 \frac{(1-\alpha)}{\alpha} dx. \quad (18)$$

При  $W=\text{const}$  величина условного коэффициента  $\hat{\alpha}$ , равная

$$\hat{\alpha} = \frac{1}{\int_0^1 \frac{1}{\alpha} dx}, \quad (19)$$

является более универсальной характеристикой звукопоглощающих свойств материала в октавной полосе анализа по сравнению с выражением (2). В случае использования аппроксимации (4) значение условного коэффициента звукопоглощения будет равно (см. формулу 6)

$$\hat{\alpha} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 \ln\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right)}{\alpha_2 - \alpha_1} = \frac{\alpha_1 \alpha_2}{\alpha}. \quad (20)$$

Для рассмотренного материала при постоянной акустической мощности источника шума условный коэффициент звукопоглощения составит

$$\hat{\alpha} = \frac{0.17 \times 0.395}{0.27} = 0.25.$$

Переменная акустическая мощность источника звука может как повысить, так и понизить среднюю плотность отраженного звука в помещении, и, соответственно, понизить или повысить величину условного коэффициента звукопоглощения. В случае использования введенных аппроксимаций для  $W$  и  $\alpha$  из равенства (17) получена развернутая формула для условного коэффициента  $\hat{\alpha}$

$$\hat{\alpha} = \frac{\alpha_1 \left[ 0.1\Delta L_w - \lg\left(\frac{\alpha_2}{\alpha_1}\right) \right] (10^{0.1\Delta L_w} - 1)}{0.1\Delta L_w \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} 10^{0.1\Delta L_w} - 1 \right)}. \quad (21)$$

При совпадении направленности графиков коэффициента звукопоглощения и акустической мощности в пределах октавной полосы условный коэффициент  $\hat{\alpha}$  будет максимальным. Для рассматрива-

емого звукопоглощающего материала при  $\Delta L_w = 10$  дБ получено  $\hat{\alpha} = 0.294$ . Это значение близко к арифметически среднему коэффициенту звукопоглощения, рассчитываемому по выражению (2). Эффективность звукопоглощающего материала существенно снижается при противоположной направленности графиков  $W$  и  $\alpha$ . При  $\Delta L_w = -10$  дБ условный коэффициент  $\hat{\alpha}$  равен  $\hat{\alpha} = 0.218$ . Таким образом, в зависимости от величины наклона графика акустической мощности источника в пределах октавы эффективность звукопоглощающего материала может измениться на 1.3 дБ и более.

Аналитические выражения получены для соразмерного помещения. В случае несоразмерных помещений при квазидиффузном отраженном звуковом поле, когда плотность отраженной звуковой энергии непостоянна по помещению невозможно получить достаточно точные и простые аналитические выражения. В этой связи для расчета действительных спадов звуковой энергии и определения ошибок усреднения акустических параметров могут быть использованы расчеты распределения звуковой энергии в узких полосах частот с последующим нахождением суммарных величин энергетических параметров звуковых полей. В данном случае анализ звукового поля выполнен на примере помещения коридорного типа с размерами  $24 \times 4 \times 3$  (h) м (см. рис. 4). Такие пропорции помещения выбраны исходя из условия высокой чувствительности распределения звуковой энергии от звукопоглощающих свойств ограждений в помещениях вытянутой формы.

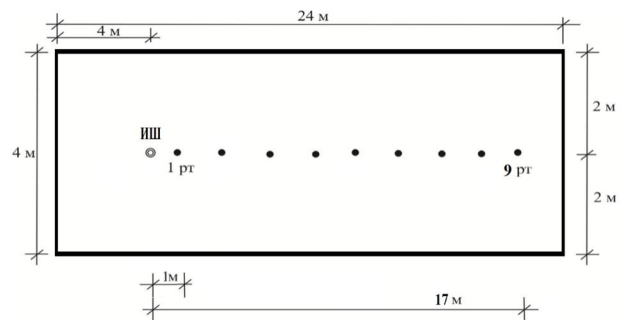


Рис. 4 – Расчетная схема помещения:

⊙ – источник звука; ● – положение и номер расчетной точки

Расчеты выполнены для октавной полосы с  $f_{\text{ср}} = 500$  Гц. Коэффициент звукопоглощения пола принят  $\alpha_n = 0.1$ . Остальные поверхности помещения облицованы материалом K-FONIK FIBER-P 30. Уровень акустической мощности источника шума в октавной полосе составляет  $L_w = 93.2$  дБ. При расчетах октавная полоса делилась на 21 диапазон.

Построены графики изменения уровней звуковой энергии вдоль оси коридора при постоянной октавной акустической мощности источника звука, но при различных линейных графиках изменения



уровней мощности в пределах октавной полосы (см. рис. 5–7):  $L_{w_1} = 80\text{дБ}$ ,  $\Delta L_w = 0\text{дБ}$  (рис. 5);  $L_{w_1} = 74.1\text{дБ}$ ,  $\Delta L_w = 10\text{дБ}$  (рис. 6);  $L_{w_1} = 84.1\text{дБ}$ ,  $\Delta L_w = -10\text{дБ}$  (рис. 7).

На сводных графиках рисунков пунктирной линией показаны графики средних уровней звукового давления в пределах октавной полосы, а линиями с маркерами даны графики суммарного уровня

шума в октавной полосе частот. Сплошными линиями показаны верхняя и нижняя границы спадов уровней звукового давления в пределах октавной полосы частот соответственно для минимального ( $\alpha=0.17$ ) и максимального ( $\alpha=0.395$ ) коэффициентов звукопоглощения помещения.

Сравнение графиков рис. 6 и рис. 7 показывает, что спектр источника шума оказывает заметное влияние на величину уровней звукового давления в

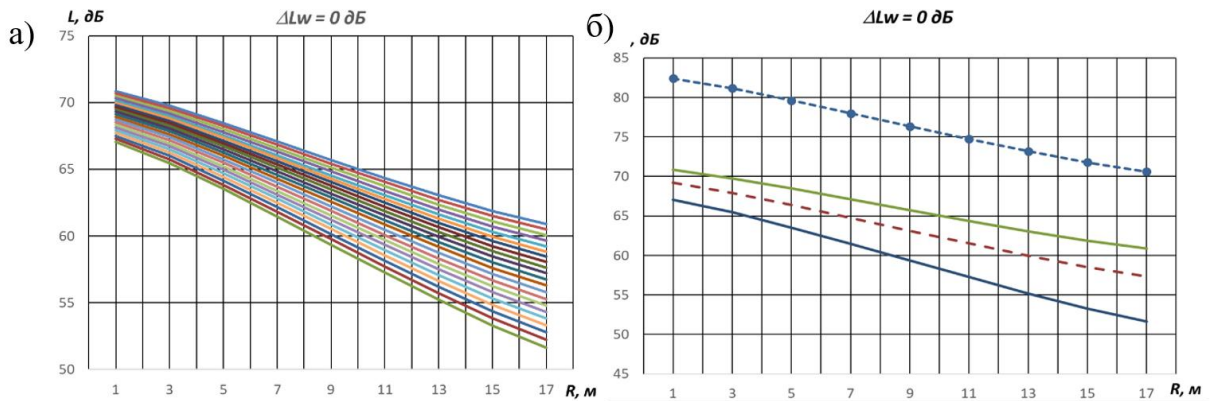


Рис. 5 – Результаты расчета звука при источнике с постоянной в пределах октавы акустической мощностью ( $\Delta L_w = 0\text{дБ}$ ): а – в 21 диапазоне частот; б – сводный график суммарного шума и огибающих значений

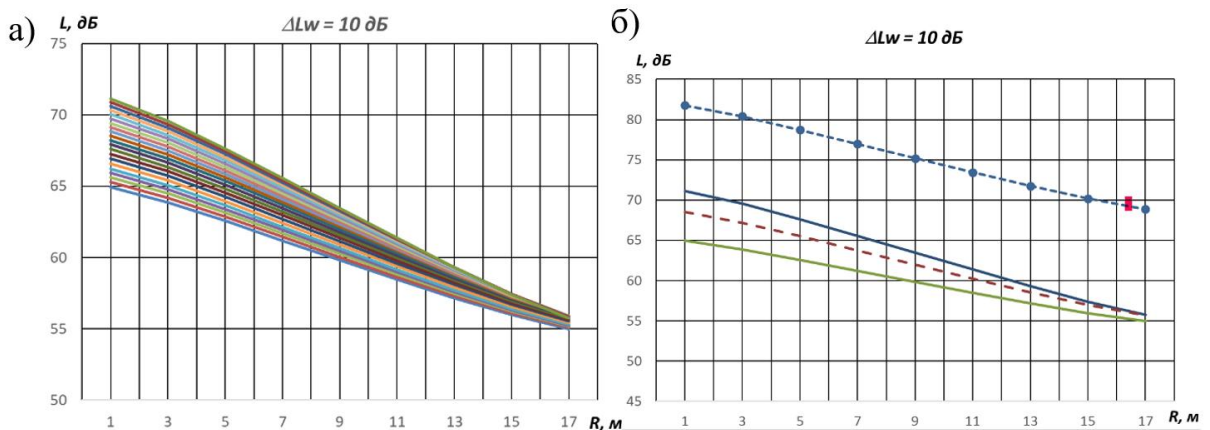


Рис. 6 – Результаты расчета звука при источнике с ростом акустической мощности в пределах октавы ( $\Delta L_w = 10\text{дБ}$ ): а – в 21 диапазоне частот; б – сводный график суммарного шума и огибающих значений

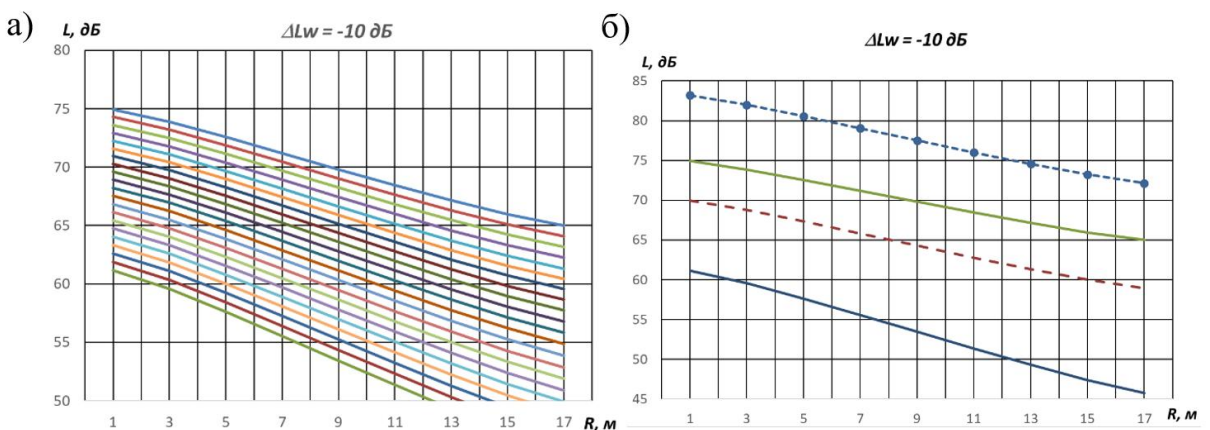


Рис. 7 – Результаты расчета звука при источнике со снижением акустической мощности в пределах октавы ( $\Delta L_w = -10\text{дБ}$ ): а – в 21 диапазоне частот; б – сводный график суммарного шума и огибающих значений



дальней от источника зоне помещения. Разность уровней в наиболее удаленной от источника расчетной точке достигает  $\Delta L = 72.2 - 68.9 = 3.3$  дБ.

Графики средних (пунктирные линии на рисунках 5,б, 6,б и 7,б) и суммарных в октаве уровней звукового давления параллельны друг другу. Величина смещения составляет  $\Delta L = 10 \lg(21) = 13.2$  дБ.

По графикам рис. 5,а, 6,а и 7,а определен условный коэффициент звукопоглощения  $\hat{\alpha}$ , который обеспечивает такой же спад уровней звуковой энергии, как спад общего уровня в октавной полосе. При постоянной в пределах октавы акустической мощности  $\Delta L_w = 0$  дБ условный коэффициент звукопоглощения равен  $\hat{\alpha} = 0.248$ , что практически совпадает с рассчитанным значением по выражению (21) для диффузного звукового поля  $\hat{\alpha} = 0.250$ . В случае роста акустической мощности  $\Delta L_w = 10$  дБ условный коэффициент звукопоглощения равен  $\hat{\alpha} = 0.287$ , что хорошо согласуется с рассчитанным значением по выражению (21)  $\hat{\alpha} = 0.294$ . Аналогичное совпадение результатов наблюдается при спадающем графике акустической мощности  $\Delta L_w = -10$  дБ. В этом случае условный коэффициент звукопоглощения равен  $\hat{\alpha} = 0.206$ , а по выражению (21)  $\hat{\alpha} = 0.218$ .

Результаты расчетов в целом показали, что для определения суммарного октавного уровня с учетом частотных характеристик звукопоглощающих материалов и акустической мощности источника шума в несоразмерных помещениях нет необходимости делить октавный диапазон на несколько поддиапазонов и выполнять расчеты шума в них с учетом соответствующих акустических характеристик. Достаточно воспользоваться уровнем октавной акустической мощности источника шума и приведенным коэффициентом звукопоглощения по выражению (21) с учетом спектра источника шума.

**Выводы.** В целом выполненные исследования показали, что энергетические параметры звуковых полей помещений зависят от спектров звукопоглощающих свойств ограждений и акустической мощности источника шума. В случае использования арифметически усредненных параметров звукопоглощения и общей акустической мощности источника шума погрешность расчета уровней звукового давления может достигать нескольких децибел.

Для повышения точности оценки параметров звуковых полей в соразмерных помещениях при использовании средних значений  $\bar{\alpha}$  и  $\bar{W}$  предложена методика расчета поправочных коэффициентов для средней плотности отраженной звуковой энергии.

Получены выражения для расчета условного коэффициента звукопоглощения, который оказывает такое же влияние на формирование звукового поля,

как и переменный коэффициент звукопоглощения в пределах октавной полосы частот. Методика расчета условного коэффициента приведена для диффузного звукового поля в соразмерном помещении, однако выполненные расчеты показали возможность ее использования также при расчете энергетических параметров звуковых полей в несоразмерных помещениях.

Предложенные методики расчета энергетических параметров звуковых полей с учетом спектральных характеристик коэффициентов звукопоглощения ограждающих конструкций и акустической мощности источников звука позволят повысить точность акустических расчетов и, соответственно, надежность проектирования средств шумозащиты.

### Библиографический список

1. Мониц, Д. В. Метод расчета звукоизоляции каркасно-обшивных перегородок / Д. В. Мониц // Приволжский научный журнал. 2021. №4(60). С. 30-36.
2. Кочкин, А. А. Физико-технические основы проектирования звукоизоляции легких ограждающих конструкций зданий из элементов с вибродемпфирующими слоями: монография / А. А. Кочкин, Н. А. Кочкин. Вологда: ВоГУ, 2022. 163 с.
3. Боголепов, И. И. Промышленная звукоизоляция / И. И. Боголепов. Л.: Судостроение, 1986. 368 с.
4. Расчеты шума при проектировании шумозащиты в производственных зданиях / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. – Москва-Берлин, 2020. 270 с.
5. Расчеты шума в гражданских и промышленных зданиях при зеркально-диффузном отражении звука от ограждений / А. И. Антонов, В. И. Леденев, И. В. Матвеева, И. Л. Шубин. – Москва : ООО «Директмедиа Паблишинг», 2022. – 192 с. – ISBN 978-5-4499-2953-2.
6. Рогалев, А. М. Исследования среднего коэффициента звукопоглощения помещений для корректировки методики определения величины изоляции транспортного шума / А. М. Рогалев, О. В. Градова, С. И. Крышов // Жилищное строительство. 2023. № 6. С. 23-27. DOI 10.31659/0044-4472-2023-6-23-27.
7. Численные методы расчета шума в несоразмерных помещениях гражданских зданий / А. И. Антонов, В. П. Гусев, В. И. Леденев [и др.] // Жилищное строительство. 2023. № 6. С. 18-22. DOI 10.31659/0044-4472-2023-6-18-22.
8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2019611868 Российская Федерация. Комплексная программа по расчету звуковых полей в помещениях и проектированию средств защиты от шума: № 2019610550: заявл. 22.01.2019: опубл. 05.02.2019 / А. И. Антонов, О. А. Жоголева, В. И. Леденев [и др.]; заявитель ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет».
9. Заборов, В. И. О пределах применимости расчета отраженного звука по статистической теории / В. И. Заборов, Н. А. Корчагин // Докл. III Всесоюз. конф. по борьбе с шумом и вибрацией. Секция «Борьба с шумом». Челябинск. 1980. С. 319-322.



10. Леденев, В. И. Оценка точности и границ применимости статистических энергетических методов при расчетах шума в производственных помещениях энергетических объектов / В. И. Леденев, Е. О. Соломатин, В. П. Гусев // *Academia. Архитектура и строительство*. 2010. № 3. С. 237-240.

11. Гусев, В. П. Акустические и динамические характеристики эластомерных строительных материалов на основе NBR-каучука / В. П. Гусев, О. А. Жоголева, В. И. Леденев, А. В. Сидорина // *Строительные материалы*. 2019. №6. С. 56-61.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 15.01.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья  
УДК 691.342:691.537  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_19

### ВЛИЯНИЕ ОТВЕРДИТЕЛЕЙ НА СВОЙСТВА ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ

© Автор, 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)

**Аннотация.** В статье рассмотрено влияние отвердителей на свойства эпоксидных композитов, где в качестве наполнителя использован бой тарного стекла. Для наполнителя предварительно подобрано оптимальное количество введения в эпоксидное связующее. Влияние отвердителей рассмотрено на физико-механические свойства, включая светопрозрачность эпоксидных композитов.

**Ключевые слова:** эпоксидная смола; отвердитель; полиэтиленполиамин; диметиламинопропанол; наполнитель; стеклобой; прочность; относительная линейная усадка

**Для цитирования:** Барковская С.В. Влияние отвердителей на свойства эпоксидных композитов // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 19-22. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_19.

Original article

### THE EFFECT OF HARDENERS ON THE PROPERTIES OF EPOXY COMPOSITES

© 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)*

**Abstract.** The article discusses the effect of hardeners on the properties of epoxy composites, where broken glass is used as a filler. The optimal amount of filler in the epoxy binder has been previously selected. The effect of hardeners has been examined on the physical, and mechanical properties, including the light transmission of epoxy composites.

**Keywords:** epoxy resin; hardener; polyethylene polyamine; dimethylaminopropanol; filler, glass chips; strength; relative linear shrinkage

**For citation:** Barcovskay S.V. The effect of hardeners on the properties of epoxy composites // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 19-22. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_19.

**Введение.** Исследования, направленные на разработку стойких полимерных материалов для различных отраслей промышленности, не теряют своей актуальности. Среди прочих для полимерных композитов широко используются эпоксидные смолы. Однако, их высокая стоимость, хрупкость, вязкость являются ограничивающими факторами, которые преодолимы за счет модификации эпоксидных смол наполнителями и заполнителями. В частности, прочностные свойства могут быть улучшены за счет совместного использования наполнителей различ-

ной природы, работы с поверхностью (механической очистки) наполнителей [1]. Также неотъемлемой частью эпоксидных композитов, влияющих на их конечные свойства, являются отвердители данных систем [2].

Эпоксидные полимеры берут свое название от эпоксидных групп, которые входят в состав полимера. Простейшим эпоксидным соединением, которое обладает хорошей реакционной способностью, является окись этилена. Данные полимеры получили широкое распространение в различных отраслях за



счет своей хорошей адгезии к другим материалам, высокой химической стойкости, электроизоляционным свойствам, малой усадки при отверждении [3].

Одним из условий при выборе наполнителя для эпоксидных композитов, как и для всех полимерных композитов, является высокая адгезия поверхности наполнителя и эпоксидного связующего. Второе условие – это совместимость наполнителя с отвердителями и катализаторами [3-4]. При выборе стеклобоя в качестве наполнителя для эпоксидных композитов оба условия выполняются. У наполнителя из боя стекла, по сравнению с наполнителем из кварцевого песка, например, более низкая гидрофильность, что положительно влияет на сцепление смолы с поверхностью наполнителя, водостойкость, пористость и прочность наполненного эпоксиды [5; 11]. Также имеет место быть экологическая сторона вопроса использования стеклобоя в эпоксидных композитах – утилизация вторичного сырья. Экологический эффект дает и использование в качестве отвердителя для эпоксидной смолы кубового остатка от производства 3-диметиламинопропанола, который рассматривается в данной работе в сравнении с полиэтиленполиамином.

**Методология.** Эпоксидные смолы не могут быть использованы без изменения молекулярного веса и пространственной структуры, для образования химических связей и перехода в твердое состояние, протекания полимеризации в эпоксидные смолы вводят отвердители. При отверждении эпоксидные смолы переходят в терморезактивное состояние [6]. Отвердители эпоксидных смол становятся частью отвержденной эпоксидной сети, поэтому вид отвердителя влияет на конечные свойства материала.

В состав каждого вида эпоксидного олигомера входят эпоксидные и гидроксильные группы, по этим реакционноспособным группам и происходит отверждение. В качестве отвердителей чаще используют амины, первичные или вторичные, которые за счет перемещения подвижного атома водорода аминогруппы взаимодействуют с концевыми эпоксидными группами [7].

В данной работе рассматриваются два вида отвердителя: полиэтиленполиамин (ПЭПА) и кубовый остаток от производства 3-диметиламинопропанола (ЗДМАП). Полиэтиленполиамин является аминным отвердителем, обладающий высоким аминным числом, что говорит о значительной активности, а также о пониженном расходе отвердителя для прохождения реакций. При взаимодействии с эпоксидными олигомерами происходит разрыв эпоксидного кольца и присоединение амина [3]. Под действием отвердителя эпоксидная смола преобразуется в нерастворимое соединение с сетчатой трехмерной структурой [8; 14]. ПЭПА является смесью этилендиамина, диэтилентриамины, триэтилтетраамины и

других сложных соединений. Преобладающий в ПЭПА этилендиамин общей формулы  $H_2N-CH_2-CH_2-NH_2$ .

Второй отвердитель – кубовый остаток производства 3-диметиламинопропанола – органическое соединение, представляющее третичный амин, является кубовым остатком от производства, отход предприятий медико-биологической промышленности. Третичные амины дают более мягкий процесс отверждения, обеспечивая большую жизнеспособность смеси. При отверждении эпоксидной смолы кубовым остатком от производства 3-диметиламинопропанола проходит свойственная третичным аминам полимеризация  $\alpha$  - оксидного цикла с участием молекул 3-диметиламинопропанола, при полимеризации происходит развитие оксидных шивок по объему полимера, они появляются при взаимодействии гидроксильных групп с эпоксидными кольцами мономера. При отверждении образуется простой полимер с эфирной связью (C–O–C), достаточно устойчивой для воздействия щелочей и кислот. Но, в тоже время, 3-диметиламинопропанол реагирует как дикарбоновые кислоты с эпоксидным мономером. Сначала при отверждении происходит раскрытие ангидритового кольца и образование моноэфира и карбоксильной группы, затем за счет взаимодействия образовавшегося моноэфира и эпоксидной группы протекает последовательное увеличение цепи [7; 8; 13].

При проведении исследований использовалась эпоксидная смола ЭД-20. Применяли два отвердителя: полиэтиленполиамин (ПЭПА) и 3-диметиламинопропанол (ЗДМАП). Эксперименты производилось на составах с наполнителем. В качестве наполнителя выступал стеклобой в количестве 0,4 по объему. Наполнитель из стеклобоя тарного стекла БТ-1 применялся фракции 0 – 0,314 мм. Оцениваемые свойства: плотность после отверждения, прочностные показатели (при сжатии и на растяжение при изгибе), относительная линейная усадка и коэффициент светопрозрачности. Коэффициент светопрозрачности определялся в виду того, что полученный в дальнейшем материал при использовании наполнителя также из стеклобоя будет достаточно светопрозрачным. При условии, что данная характеристика может иметь значение, например, при изготовлении химически стойкой баковой аппаратуры, влияние отвердителя на данную характеристику также принималось во внимание. Для определения свойств изготавливались образцы-балочки 4 × 4 × 16 см, коэффициент светопрозрачности оценивался на образцах 4 × 4 × 1 см.

Определение светопрозрачности (прозрачности) производилось на спектрофотометре, который определяет коэффициенты пропускания прозрачных веществ в спектре 190 – 1100 нм, как жид-

ких, так и твердых. Коэффициент светопрозрачности – это отношение напряжения светового потока, проходящего через изучаемый материал к напряжению светового потока, проходящего по опорному каналу без образца.

**Результаты.** В таблице 1 приведены результаты, на основе которых выбрана степень наполнения эпоксидного композита наполнителем из боя стекла 0,4 об. доли. Определение порога эффективности введения наполнителя определяли с применением традиционного отвердителя – полиэтиленполиамин.

стекла в качестве наполнителя, приведены на рисунке 1.

По результатам, приведенным на рисунке 1, видно, что значения рассмотренных свойств, исключая показатели прочности на растяжение при изгибе, при применении в качестве отвердителя для эпоксидной смолы кубового остатка от производства 3-диметиламинопропанола ниже.

**Обсуждение.** Оптимальным количеством наполнителя из боя стекла в эпоксидных композитах является диапазон 0,3 – 0,4 об. доли. Увеличение степени наполнения не дает положительного эф-

Таблица 1 – Влияние введения наполнителя на свойства

Наименование показателя	Степень объемного наполнения эпоксидного полимера								
	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	1160	1300	1430	1498	1620	1625	1682	1720	1760
Предел прочности при сжатии, МПа	72	71	69	74	76	73	71	59	57
Относительная линейная усадка, %	0,050	0,045	0,042	0,036	0,033	0,032	0,030	0,028	0,028

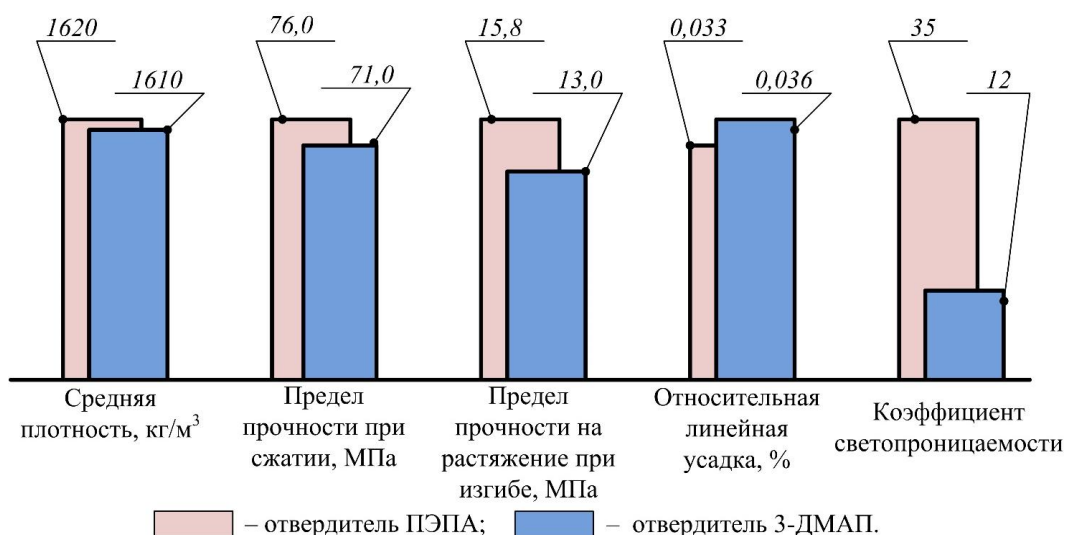


Рисунок 1 – Влияние отвердителя на свойства наполненных эпоксидных композитов

Снижение относительной линейной усадки при увеличении количества наполнителя в рассматриваемой системе ожидаемо, т.к. этот эффект от наполнения систем на различного рода вяжущих является одной из причин использования наполнителей и мелкого заполнителя в разнообразных видах композитов. По результатам влияния на прочность при сжатии, несмотря на снижение прочности в диапазоне 0,1 – 0,2 об. доли наполнения, порог эффективности для наполнителя из боя стекла находится в интервале 0,3 – 0,5 об. доли, где прочность при сжатии выше на 1,4 – 5,6%, а величина относительной линейной усадки снижается на 28 – 36% по сравнению с эпоксидной смолой без введения наполнителя.

Результаты сравнения работы отвердителей в эпоксидных композитах, с использованием боя

факта из-за нехватки полимерного связующего, что способствует разрыву сплошности матрицы и повышению порообразования [4; 9].

При введении отвердителя 3-диметиламинопропанола только в эпоксидную смолу без наполнителя из боя стекла после отверждения визуально получали полимер более плотным и с прозрачностью большей, чем при использовании в качестве отвердителя полиэтиленполиамин. Коэффициент светопрозрачности при отверждении 3ДМАП и ПЭПА при нулевой степени наполнения эпоксидной смолы составлял 0,72 и 0,6 соответственно. Таким образом, введение наполнителя из боя стекла привело к значительному снижению светопрозрачности композита. Предел прочности при сжатии эпоксидной смолы без введения наполнителя в случае отвердителя 3ДМАП также выше на 7%.



**Выводы.** Из полученных результатов следует, что применение обоих отвердителей рационально, т.к. снижение некоторых свойств не так значительно. При сравнении с наименьшим значением снижение от использования отвердителем ЗДМАП по сравнению с ПЭПА: средняя плотность на 0,6%, предел прочности при сжатии 7%. Снижение величины предела прочности при сжатии и коэффициента светопрозрачности при отверждении ЗДМАП по сравнению с ПЭПА может быть вызвано применением в качестве наполнителя боя стекла, учитывая результаты полученные другими авторами [7]. При использовании более классических наполнителей (тонкомолотого кварцевого песка) отвердитель ЗДМАП показывает себя более перспективным, по сравнению с традиционным полиэтиленполиамином [7; 10].

#### Библиографический список

1. Гаврилов, М. А. Прочностные свойства модифицированных эпоксидных композитов / М. А. Гаврилов, Д. М. Гаврилова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2021. – № 2(13). – С. 14-19. – EDN RFSKGU.
2. Гаврилов, М. А. Прочностные и деформативные свойства эпоксидных защитных композитов / М. А. Гаврилов, В. Т. Ерофеев // Региональная архитектура и строительство. – 2024. – № 1(58). – С. 59-64. – DOI 10.54734/20722958\_2024\_1\_59. – EDN LAGPSL.
3. Воробьев В.А., Андрианов Р.А. Технология полимеров: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1980. 303 с.
4. Патуроев В.В. Полимербетоны. М.: Стройиздат, 1987. 286 с.
5. Гаврилов, М. А. Водостойкость и водопоглощение модифицированных эпоксидных композитов / М. А. Гаврилов, Д. М. Гаврилова // Вестник ПГУАС: строительство, наука и образование. – 2023. – № 2(17). – С. 16-22. – EDN NVLDXL.
6. Коршак В.В. Технология пластических масс. М: Химия. 1985. 560 с.
7. Кондратьева Е.В. Щелочестойкие эпоксидные композиты: специальность 05.23.05 «Строительные материалы и изделия»: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Кондратьева Елена Вячеславовна. – Пенза, 2000. – 190 с.
8. Оценка влияния отвердителя на механические свойства эпоксидных покрытий на основе смолы ЭД-20 / С. В. Смирнов, И. А. Веретенникова, Д. А. Коновалов [и др.] // Diagnostics, Resource and Mechanics of Materials and Structures. – 2023. – № 1. – С. 6-16. – DOI 10.17804/2410-9908.2023.1.006-016. – EDN HHHGER.
9. Бобрышев, А.Н. Прочность и долговечность полимерных композиционных материалов / А.Н. Бобрышев, В.Н. Козомазов, Р.В. Козомазов, А.В. Лахно, В.В. Тучков. – Липецк: РПГФ «Юлис», 2006. – 170 с.
10. Исследование эффекта дополимеризации эпоксидных композитов / А. Н. Бобрышев, Е. В. Кондратьева, Д. Е. Жарин, А. А. Бобрышев // Строительные материалы. – 2005. – № 5. – С. 48-52. – EDN HZFVWJ.
11. Эпоксидные пресс-композиты на основе отходов производства с применением ультрадисперсных модификаторов / М. А. Гаврилов, В. А. Худяков, Н. Г. Лесова, Н. Н. Иванкина // Региональная архитектура и строительство. – 2009. – № 2. – С. 10-16. – EDN KYTHAT.
12. Модифицированные аминные отвердители эпоксидных смол / З. А. Зубкова, Т. А. Довгополик, М. Ф. Стецюк [и др.] // Пластические массы. – 2007. – № 3. – С. 31-34. – EDN NBNWFP.
13. Братасюк, Н. А. Кинетика отверждения эпоксидно-уретановых композиций аминными отвердителями различной природы / Н. А. Братасюк, В. В. Зуев // Журнал прикладной химии. – 2020. – Т. 93, № 10. – С. 1432-1445. – DOI 10.31857/S0044461820100047. – EDN ATWHGI.
14. Хорохордин, А. М. Эпоксидные композиции в строительстве (обзор) / А. М. Хорохордин, Е. А. Хорохордина, О. Б. Рудаков // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Физико-химические проблемы и высокие технологии строительного материаловедения. – 2017. – № 1(14). – С. 7-18. – EDN ZEUOL.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 06.02.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 06.02.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья

УДК 624.012.44, 624.012.45

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\_1\_23

## РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНОЙ БАЗЫ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЁЖНОСТИ И ДОЛГОВЕЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

©Авторы, 2026

SPIN: 7890-9506

ORCID: 0000-0003-3420-9518

Scopus ID: 57189362370

**ИВАНОВ Эрнест Николаевич**

руководитель проекта

ООО «Русвиндэнерго»

(Россия, Москва, e-mail: 79602615868@yandex.ru)

SPIN: 8220-6921

ORCID: 0000-0003-3850-424X

Scopus ID: 56091980300

**ЛАЛИН Владимир Владимирович**

д.т.н., профессор

Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

(Россия, Санкт-Петербург, e-mail: vllalin@yandex.ru)

**Аннотация.** В отечественной и зарубежной практике возведения бетонных и железобетонных конструкций встаёт вопрос обеспечения их трещиностойкости в период строительства ввиду неравномерного распределения температурных и влажностных полей в массиве. Возникающие в результате данных явлений напряжения могут привести к трещинам, закрытие которых в период твердения невозможно, вследствие чего не обеспечивается надлежащее качество строительной конструкции, а значит надёжность и долговечность во время эксплуатации. Нормами закреплено требование об учёте на стадии проектирования температурно-влажностных воздействий строительного периода. Вместе с тем, в существующей российской нормативной базе отсутствует чёткая процедура, регламентирующая учёт влажностных воздействий и содержащая условие влажностной трещиностойкости, выступающее за критерий соответствующего предельного состояния. Не приведены однозначные параметры классификации железобетонных конструкций по массивности. Данные обстоятельства вызывают затруднения при проектировании бетонных и железобетонных конструкций. В статье приведены возможные пути преодоления указанных препятствий при проектировании железобетонных конструкций на стадии возведения применительно к усадке бетона; предложены дополнения строительных норм уточняющими формулировками, однозначно фиксирующими классификацию бетонных и железобетонных конструкций по массивности и требования к расчёту.

**Ключевые слова:** бетонные конструкции; железобетонные конструкции; молодой бетон; строительный период; влажностные воздействия; усадочные напряжения; усадочные трещины; трещиностойкость

**Для цитирования:** Иванов Э.Н., Лалин В.В. Развитие нормативной базы по обеспечению надёжности и долговечности железобетонных конструкций // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 23-28. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_23.

Original article

## REGULATORY BASE DEVELOPMENT TO ENSURE THE RELIABILITY AND DURABILITY OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES

© The Author(s) 2026

**IVANOV Ernest Nikolaevich**

project leader

LLC «Ruswindenergo»

(Russia, Moscow, email: 79602615868@yandex.ru)

**LALIN Vladimir Vladimirovich**

d.t.sc., professor

Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

(Russia, Saint-Petersburg, email: vllalin@yandex.ru)



**Abstract.** In domestic and foreign practice of constructing concrete and reinforced concrete structures, the question arises of ensuring their crack resistance during construction due to the uneven distribution of temperature and humidity fields in the mass. The stresses resulting from these phenomena can lead to cracks, which cannot be closed during the hardening period, as a result of which the proper quality of the building structure is not ensured, and therefore its reliability and durability during operation. Building codes require that temperature and humidity effects during the construction period be taken into account at the design stage. However, at the same time, the existing Russian regulatory framework lacks a clear procedure regulating the consideration of humidity effects and containing a condition of humidity crack resistance, which acts as a criterion for the corresponding limit state. There are no clear parameters for classifying reinforced concrete structures according to massiveness. These circumstances cause difficulties in the design of concrete and reinforced concrete structures. The article presents possible ways to overcome these obstacles when designing reinforced concrete structures at the construction stage in relation to concrete shrinkage; additions to building codes are proposed with clarifying wording that unambiguously establishes the classification of concrete and reinforced concrete structures by massiveness and calculation requirements.

**Keywords:** concrete structures; reinforced concrete structures; early-age concrete; building period; humidity effects; shrinkage stresses; shrinkage cracks; crack resistance

**For citation:** Ivanov E.N., Lalin V.V. Regulatory base development to ensure the reliability and durability of reinforced concrete structures // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 23-28. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_23.

**Введение.** Молодой бетон в период строительства требует особенного ухода, что вызвано неравномерным распределением температурных и влажностных полей в блоке бетонирования [1-2]. Последние являются следствием экзотермической реакции гидратации цемента [3] и неравномерного остывания массива по сечению. Неравномерные температурные поля приводят к появлению и развитию температурных напряжений, в то время как неравномерные влажностные поля – к напряжениям усадки<sup>1</sup> [4-5]. Превышение указанных напряжений определённых пределов вызывает образование температурных и усадочных трещин соответственно. Таким образом, обязательным этапом, предшествующим разработке регламента бетонирования, как части проекта производства работ [6], является расчёт железобетонных конструкций в строительный период на температурно-влажностные воздействия.

Основным сводом правил, регламентирующим расчёт железобетонных конструкций в строительный период на температурно-влажностные воздействия, является СП 41.13330.2012. Его действие распространяется на проектирование гидротехнических сооружений (п. 1). Отсутствие формализации применения СП 41.13330 для расчёта железобетонных конструкций независимо от назначения объекта капитального строительства и его функционально-технологических особенностей в соответствии с классификацией, установленной Приказом Минстроя от 02.11.2022 г. № 928/пр, вызывает затруднение (*затруднение №1*) расчётного обоснования надёжности и долговечности железобетонных конструкций в целом.

Согласно п. 10.4 СП 41.13330.2012 необходимость учёта влажностных воздействий в расчётах бетонных и железобетонных конструкций в строитель-

ный период требуется обосновать в зависимости от возможности развития усадки. Однако, не приведена конкретная методика оценки возможности развития усадки (*затруднение №2*). Вероятно, предполагается не учитывать усадку для массивных конструкций, тонкостенных конструкций в случае предотвращения высыхания бетона в строительный период, что прописано в п. 10.4 СП, но отсутствуют определения массивной и тонкостенной конструкций (*затруднение №3*), также установлено, что усадка достаточно сложный процесс и зависит не только от габаритов железобетонной конструкции (также *затруднение №2*) [7].

Более того, самый надёжный вариант определения вероятности появления усадочных трещин – расчётный способ – особенно необходим для трещиностойких конструкций, сооружений нормального и повышенного уровня ответственности [8]. Следовательно, для обоснования необходимости учёта влажностных воздействий в строительный период инженеру требуется выполнить соответствующий расчёт и, если величина усадочных напряжений (трещин) невелика (точный критерий в СП 41.13330.2012 не установлен), не учитывать в дальнейшем влажностные воздействия. Тогда возникают справедливые вопросы (*затруднение №4*):

а) если расчёт на влажностные воздействия выполнен, то как обосновать допустимость пренебрежения усадкой с нормативной точки зрения? Иными словами, какой критерий пренебрежения усадкой принимать инженеру?

б) с какой целью отказываться от результатов расчёта и не учитывать усадку, даже при её малости и допущении, что экспертиза проектной документации примет обоснование п. (а) выше?

<sup>1</sup> Конструкции, бетонируемые под водой, не рассматриваются, поэтому исследования ограничены только явлениями усадки.



в) расчёты, как правило, носят итерационный характер [9-10], особенно при подборе оптимальных габаритов захваток бетонирования [11] и/или других конструктивных и технологических мероприятий по уходу за бетоном [12-13], а значит, не приведёт ли постоянный контроль обоснованности учёта усадки к ошибкам и не рационально ли учитывать усадку всегда?

Дальнейший анализ норм показал, что в п. 7.2 СП 41.13330.2012. п. 8.15 СП 58.13330.2019: отсутствует методика по определению усилий от деформаций усадки для конструкций без предварительного напряжения и не стержневой конфигурации (*затруднение №5*).

Пункты 7.9, 7.10 СП 41.13330.2012 противоречат п. 7.7 (*затруднение №6*):

п. 7.9: «При оценке прочности и трещиностойкости элементов ... последние определяются *методами теории упругости*»

п. 7.10: «Напряжения в расчётных сечениях элемента *определяются методами теории упругости (см. 7.7), ...*»

п. 7.7: «При проверке несущей способности и пригодности к нормальной эксплуатации сооружения внутренние усилия, напряжения, перемещения и углы поворота следует определять, *с учётом неупругого поведения конструкций...*».

#### Методология

С целью преодоления затруднений, указанных в настоящей статье, предлагается следующее:

1. Расширить правовое поле СП 63.13330.2018, дополнив абзац 3 п. 10.2.3 следующей формулировкой (выделено *курсивом*): «Расстояния между постоянными, *временными* температурно-усадочными швами следует устанавливать расчётом *согласно СП 41.13330*», что позволит разрешить затруднение №1, обеспечив юридическую законность расчёта железобетонных конструкций *любого назначения* на температурно-влажностные воздействия в строительный период по СП 41.13330.

2. Дополнить СП 41.13330.2012 определением массивности и соответствующей классификацией согласно СНиП II-И.14-69 (СНиП II-V.1-62) (таблица 1), которая строится на величине модуля поверхности конструкции,  $M_o$  – отношение площади поверхности, открытой для влагообмена со средой, к объёму всего блока бетонирования (формула (1)).

Таблица 1 – Классификация по массивности

$M_o \leq 2 \text{ м}^{-1}$	– массивная конструкция
$2 < M_o \leq 15 \text{ м}^{-1}$	– средне массивная
$M_o > 15 \text{ м}^{-1}$	– немассивная

$$M_o = \frac{F}{V}, \quad (1)$$

где  $F$  – площадь элемента, открытого для влагообмена со средой,  $\text{м}^2$ ;  $V$  – объём элемента,  $\text{м}^3$

Указанное дополнение позволит разрешить затруднение №3 и однозначно зафиксировать отнесение конструкции к определённому классу по массивности.

3. Уточнить требование п. 10.4 СП 41 в части пренебрежения усадкой железобетонных конструкций дополнением (выделено *курсивом*): «*При соответствующем обосновании* допускается не учитывать усадку бетона в расчётах: массивных конструкций, тонкостенных конструкций...». Таким образом, по умолчанию учёт влажностных воздействий необходим, однако, в случае надлежащего обоснования – допускается не учитывать. Данное уточнение позволяет частично разрешить затруднение №2, полностью затруднение №4(б), №4(в).

4. Исключить п. 7.9 СП 41.13330.2012, а формулировку п. 7.10 изменить (выделено *курсивом*): «Напряжения в расчётных сечениях элемента определяются методами *согласно* п. 7.7».

Согласованность пунктов СП 41.13330.2012 в части применения аппарата теорий упругости и пластичности поможет разрешить затруднение №6.

Таким образом, нерешёнными остаются: часть затруднения №2, затруднение №4(а), затруднение №5, которые сводятся к 2-м вопросам:

1. как максимально просто и достоверно обосновать возможность пренебрежения усадкой железобетонных конструкций в строительный период?

2. как учесть усадку, в случае отсутствия возможности её пренебрежения для железобетонных конструкций в строительный период?

Данные вопросы рассматриваются в других работах автора. В настоящей статье приводится практическое подтверждение зависимости усадки не только от массивности, но и от других факторов, также подчёркивается степень чувствительности результатов расчёта к неоднозначной трактовке положений СП 41.13330.2012 в части массивности.

Расчёты производятся в программе Diana FEA (разработано Отделением вычислительной механики Делфтского Научно-исследовательского института зданий и сооружений, Нидерланды, <https://dianafea.com/>). За расчётный случай принимается плита с характеристиками согласно таблице 2.

Таблица 2 – Геометрия конструкции и основания

$M_o, \text{м}^{-1}$	Размеры плиты $a \times b \times h, \text{м}$	Размеры основания $a \times b \times h, \text{м}$
0,67<2	20×20×2,2	50×50×20

где  $a, b, H$  – соответственно длина, ширина и высота плиты, м.

Модуль поверхности составляет  $0,67 \text{ м}^{-1}$ , соответствующий массивной конструкции, следова-



тельно в расчётах принимается коэффициент условия работы  $\gamma_{b6} = 1,15$  согласно п. 10.9 СП 41.13330.2012.

Алгоритм расчёта подразумевает задание геометрии, материалов, опор, начальных и граничных условий, нагрузок, сетки метода конечных элементов (МКЭ, расчёта МКЭ и анализа.

За расчётную модель усадки бетона принимается модель EN 1992-1-1, как наиболее близко отвечающая практике [14], так и закреплённая национальным приложением в виде СП 219.1325800.2014. Модель учитывает факторы согласно таблице 3.

**Таблица 3 – Параметры модели усадки в соответствии с EN 1992-1-1**

$f_{ck}$	$RH$	$h_o$	$t_s$	$CEM$	$Q_{max}$	$T_{c,init}$	$T_{ext}$	$A_{20}$
[МПа]	[%]	[м]	[сут]	[-]	[кДж/м <sup>3</sup> ]	[°C]	[°C]	[1/сут]
25	60	1,5	0	R	189000	20	15	0,65

где  $f_{ck}$  – характеристическая прочность бетона на одноосное сжатие, МПа;

$RH$  – относительная влажность окружающей среды, %;

$h_o$  – приведённая толщина железобетонной конструкции, м (для плоских и пространственных конструкций принимается обратной величине  $M_o$ );

$t_s$  – возраст бетона в момент начала испарительной усадки, сут;

$CEM$  – класс цемента по прочности (S, N, R)

$Q_{max}$  – максимальное тепловыделение 1 м<sup>3</sup> бетона, кДж/м<sup>3</sup> (принимается на основе лабораторных испытаний)

$T_{c,init}$  – температура бетонной смеси в момент укладки, °C;

$T_{ext}$  – температура окружающей среды, °C;

$A_{20}$  – показатель темпа роста тепловыделения при постоянной во времени температуре твердения, 1/сут (принимается на основе лабораторных испытаний).

Расчётные характеристики основания принимаются по таблице 4.

**Таблица 4 – Характеристики основания (модель Кулона-Мора)**

Разновидность грунта	Выбор	Супесь	–
Плотность грунта	$\rho_g$	2000	кг/м <sup>3</sup>
Удельное сцепление	$c_{II}$	15,0	кПа
Угол внутреннего трения	$\varphi_{II}$	27	°
Удельное сцепление грунта на контакте	$c_k$	0,0	кПа
Коэффициент условий работы	$\gamma_k$	0,68	–
Угол трения грунта на контакте	$\delta$	18	°
Модуль деформации	$E_g(E_{oed})$	16,0	МПа
Коэффициент поперечной деформации	$\nu_g$	0,3	–
Коэффициент температурного расширения	$\alpha_g$	1.0E-05	°C <sup>-1</sup>
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_{th}$	1,64	Вт/м×°C
Объёмная теплоёмкость	$C_{th}$	2817000	Дж/м <sup>3</sup> ×°C

Характеристики материала конструкции принимаются по таблице 5.

**Таблица 5 – Характеристики материала плиты (модель EN 1992-1-1)**

Класс бетона	Выбор	C25/30	–
Класс цемента по прочности	$CEM$	R	–
Характеристическая прочность на одноосное сжатие	$f_{ck}$	25,0	МПа
Модуль деформации	$E_{cm}$	31	ГПа
Плотность бетона	$\rho$	2400	кг/м <sup>3</sup>
Деформации при максимальном сжимающем напряжении	$\epsilon_{c1}$	0,0021	–
Предельные деформации	$\epsilon_{cu1}$	0,0035	–
Коэффициент поперечной деформации	$\nu_c$	0,2	–
Коэффициент температурного расширения	$\alpha_c$	1.0E-05	°C <sup>-1</sup>
Коэффициент теплопроводности	$\lambda_c$	2,67	Вт/м×°C
Объёмная теплоёмкость	$C_{cv}$	2400000	Дж/м <sup>3</sup> ×°C

Для обеспечения сходимости расчёта основание закрепляется от вертикальных и горизонтальных перемещений: нижняя и боковые грани тела грунта соответственно.

Начальные и граничные условия:

а) граничные условия 3-го рода (*теплообмен со средой*) – описывается формулой (2):

$$\frac{\partial T}{\partial n} = \frac{\beta}{\lambda_c} (T_{ext} - T_{border}), \quad (2)$$

где  $n$  – нормаль к поверхности конструкции;  $\beta$  – коэффициент теплоотдачи – зависит от вида поверхности и состояния газа (воздуха), окружающего плиту – принимается 24 Вт/(м<sup>2</sup>×°C), как для свободной поверхности без теплоизоляции;  $T_{border}$  – температура на поверхности плиты (определяется расчётом температурных полей).

б) граничные условия 4-го рода (*теплообмен между твёрдыми телами*) – определяется формулой (3):

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} = \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n}. \quad (3)$$

в) механические граничные условия – модель Кулона-Мора;

г) начальные условия – температура бетона в момент укладки  $T_{c,init}$ .

Учитываются нагрузки от собственного веса элементов.

Сетка конечных элементов назначается в зависимости от наименьшего размера тела и сгущается до тех пор, пока результаты распределения температурных полей не перестанут изменяться более 5%.

**Результаты.** На рисунках 1 и 2 представлены результаты расчёта железобетонной плиты в строительной период без учёта (только на температурные



воздействия) и с учётом (на температурно-влажностные воздействия) усадки.

За условие трещиностойкости принимается критерий П.И. Васильева [15], закреплённый п. 10.13 СП 41.13330.2012 (формула (4)). Правая часть данного критерия для упрощения именуется условной прочностью  $R_{cond}$ .

$$\sigma(t) \leq \gamma_{b3} \gamma_{b6} \varepsilon_{lim} \varphi(t) E_b(t) \quad (4)$$

где  $\sigma(t)$  – напряжения в момент времени, МПа;  $\gamma_{b3}$  – коэффициент условия работы, учитывающий влия-

определена с учётом коэффициента  $\gamma_{b6} = 1,15$ , как для массивных конструкций, а в случае принятия инженером  $\gamma_{b6} = 1$  (как для немассивных конструкций) критерий трещиностойкости не выполнится и для последующих суток, что влияет на мероприятия по уходу за бетоном. Таким образом, доказано: отсутствие чёткой классификации по массивности может привести к значительным ошибкам и неверному проектированию мероприятий по уходу за бетоном.

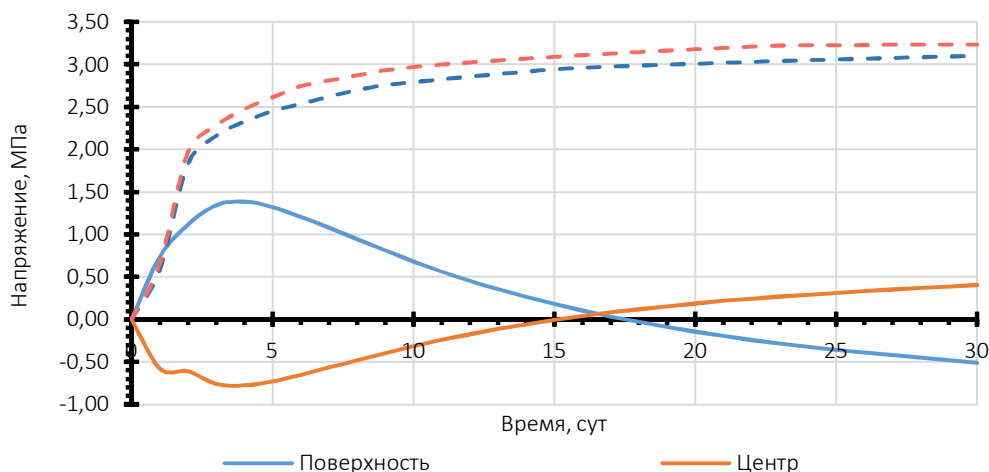


Рисунок 1 – Напряжения без усадки вдоль горизонтальной оси X,  $\sigma_{xx,nsH}$ , и условная прочность,  $R_{cond}$

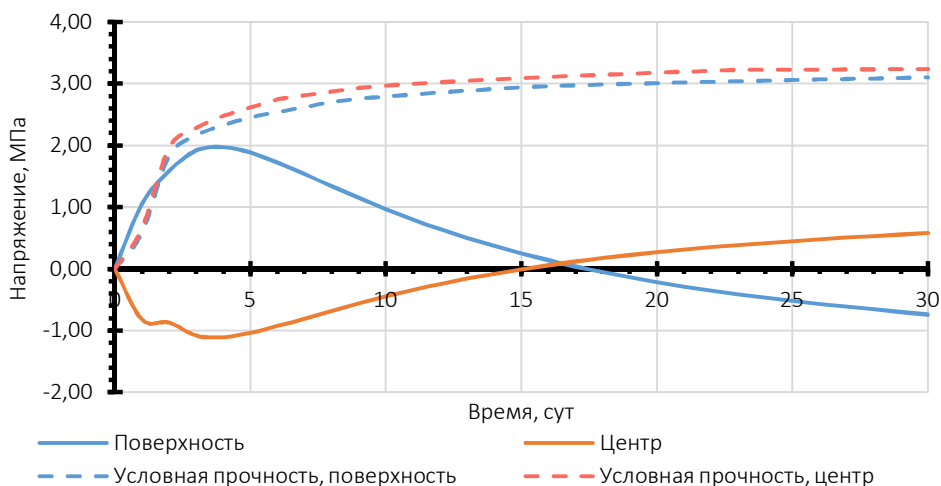


Рисунок 2 – Напряжения с усадкой вдоль горизонтальной оси X,  $\sigma_{xx,ysh}$ , и условная прочность,  $R_{cond}$

ние на прочность растянутого бетона градиента деформаций по сечению (зависит от класса бетона, его структуры, влажности и высоты растянутой зоны бетона);  $\varepsilon_{lim}$  – предельная растяжимость бетона;  $\varphi(t)$  – коэффициент учёта влияния возраста бетона на предельную растяжимость (см. таблицу Б.7 СП 41.13330.2012);  $E_b(t)$  – модуль деформации бетона в зависимости от возраста, МПа.

**Обсуждение.** Расчёт без учёта усадки (рисунок 1) показывает нарушение критерия трещиностойкости в первые сутки. Однако, условная прочность

Расчёт с учётом усадки (рисунок 2) показал невыполнение критерия трещиностойкости в первые трое суток, что подтверждает необходимость, даже для массивных железобетонных конструкций учитывать влажностные воздействия в строительный период.

#### Выводы

1. Предлагается абзац 3 п. 10.2.3 СП 63.13330.2018 дополнить следующей формулировкой (выделено курсивом): «Расстояние между постоянными, *временными* температурно-



усадочными швами следует устанавливать расчётом согласно СП 41.13330».

2. Предложено дополнить СП 41.13330.2012 определением массивности и соответствующей классификацией согласно СНиП II-И.14-69 на основе модуля поверхности конструкции.

3. Предложено уточнить требование п. 10.4 СП 41.13330.2012 в части пренебрежения усадкой железобетонных конструкций дополнением (выделено курсивом): «При соответствующем обосновании допускается не учитывать усадку бетона в расчётах: массивных конструкций, тонкостенных конструкций...».

4. Предложено исключить п. 7.9 СП 41.13330.2012.

5. Предложено изменить формулировку п. 7.10 СП 41.13330.2012: «Напряжения в расчётных сечениях элемента определяются методами согласно п. 7.7».

#### Библиографический список

1. Aniskin, N., Chuc Nguyen, T., Kiet Bui A. The use of ice to cool the concrete mix in the construction of massive structures // E3S Web Conf. Tashkent, 2021. Vol. 264. P. 02047.

2. Wang, D.B., Song, X.B., Nie H.Y. Cracking analysis of massive concrete with large-diameter pipes during construction // Constr. Build. Mater. 2022. Vol. 338. P. 127636.

3. Лотов, В.А., Саркисов, Ю.С., Горленко, Н.П., Зубкова О.П. Процессы тепловыделения при гидратации и твердении цемента в присутствии микрокремнезема и суперпластификатора // Известия высших учебных заведений. Серия химия и химическая технология. 2021. Vol. 2, № 65. P. 79–87.

4. Kheir J. et al. Chemical shrinkage of low water to cement (W/c) ratio cem i and cem iii cement pastes incorporating silica fume and filler // Materials (Basel). MDPI AG, 2021. Vol. 14, № 5. P. 1–13.

5. Волков, А.С., Храмогин А.А. Методики определения полей влажности в бетонных и железобетонных конструкциях из высокопрочного модифицированного бетона // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. 2025. Vol. 1, № 171. P. 45–51.

6. Каприелов, С.С., Шейнфельд, А.В., Джалалы А.О. Технология возведения конструкций каркасов

высотных зданий из высокопрочных бетонов классов В60-В100 // Вестник НИЦ Строительство. 2022. Vol. 2, № 33. P. 106–121.

7. Мухин М.С. Усадка бетона и железобетона на природных пористых заполнителях // Вестник науки. 2025. Vol. 1, № 82. P. 1173–1179.

8. Ведяков, И.И., Еремеев, П.Г., Соловьёв Д.В. Научно-техническое сопровождение и нормативные требования при реализации проектов зданий и сооружений повышенного уровня ответственности // Промышленное и гражданское строительство. 2018. Vol. 12. P. 14–19.

9. Редикульцев Е.А. Построение модели расчета массивных железобетонных конструкций на ранних этапах возведения // Жилищное строительство. 2023. Vol. 4. P. 3–11.

10. Чижов, С.В., Смирнов, В.Н., Ледяев А.П. Многокритериальный принцип обоснования технологии возведения монолитных железобетонных мостов в Арктической зоне РФ // Путевой навигатор. 2023. Vol. 54, № 80. P. 38–48.

11. Жарницкий В.Я., Смирнов А.П. А.Е.П. Экспериментально-теоретическое обоснование метода оценки трещиностойкости и расстояния между усадочными швами бетонных облицовок водохозяйственных каналов // Природообустройство. 2022. Vol. 2. P. 63–68.

12. Травуш В.И., Никифоров С.В. Технология бетонирования массивных конструкций фундаментов зданий МФК «Лахта Центр» // Строительство и реконструкция. 2025. Vol. 2, № 118. P. 44–55.

13. Никифоров, С.В., Травуш, В.И., Семёнов К.В. Расчёт термонапряжённого состояния при бетонировании нижней плиты коробчатого фундамента здания «Башня МФК «Лахта Центр»» // Строительное производство. 2025. Vol. 2. P. 111–118.

14. Chylík R. et al. An analysis of the applicability of existing shrinkage prediction models to concretes containing steel fibres or crumb rubber // J. Build. Eng. 2019. Vol. 24. P. 1–12.

15. Никифоров, С. В., Терновский М.В. Контроль термонапряженного состояния при бетонировании массивных конструкций фундаментов высотных зданий // Строительство и реконструкция. 2025. Vol. 3, № 119. P. 30–44.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 20.01.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 20.01.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья

УДК 624.042.5:536.468

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\_1\_29

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И РАСЧЕТЫ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕТОНА И АРМАТУРНОЙ СТАЛИ

© Авторы, 2026  
SPIN: 8213-6694

**ИЛЬИН Николай Алексеевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры ЖБК  
*Самарский государственный технический университет*  
(Россия, Самара, e-mail: sk@samgtu.ru)

SPIN: 4238-7371

**ПАНФИЛОВ Денис Александрович**  
кандидат технических наук, заведующий кафедрой ЖБК  
*Самарский государственный технический университет*  
(Россия, Самара, e-mail: panda-w800i@yandex.ru)

SPIN: 2144-4710

**МОРДОВСКИЙ Сергей Сергеевич**  
кандидат технических наук, доцент кафедры ЖБК  
*Самарский государственный технический университет*  
(Россия, Самара)

**ВАСЮЧКИН Герман Романович**  
инженер кафедры ЖБК  
*Самарский государственный технический университет*  
(Россия, Самара)

**Аннотация.** Даны результаты анализа натуральных экспериментов и результаты математического описания параметров теплофизических характеристик бетона и арматурной стали железобетонных элементов зданий. Построена математическая модель процесса изменения теплофизических свойств бетона в условиях высокотемпературного нагрева. Предложена экспонента, получены основные ее показатели для сглаживания экспериментальной зависимости изменения прочности бетонов и арматурных сталей железобетонных конструкций в процессе испытания их на огнестойкость по признаку потери несущей способности. Приведены теплофизические характеристики бетонов и арматуры в условиях нагрева в пределах 100-1000°C. Построены графики «степень нагрева – коэффициент условий работы бетона для стержневой и проволочной арматуры». Представлены методика расчета на огнестойкость предварительно напряженной многослойной железобетонной плиты перекрытия. Результаты НИР используют при составлении алгоритмов и программ для ЭВМ по расчету фактической огнестойкости несущих железобетонных конструкций зданий.

**Ключевые слова:** железобетонные элементы; теплофизические характеристики бетона; арматуры; коэффициенты условия работы нагретого бетона; термпрочность бетона и арматуры; математическое описание; расчет огнестойкости

**Для цитирования:** Математическое описание и расчеты теплофизических характеристик бетона и арматурной стали / Н.А. Ильин, Д.А. Панфилов, С.С. Мордовский, Г.Р. Васючкин // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 29-33. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_29.



Original article

MATHEMATICAL DESCRIPTION AND CALCULATIONS OF THE THERMOPHYSICAL CHARACTERISTICS OF CONCRETE AND REINFORCED STEEL

© The Author(s) 2026 **ILYIN Nikolay Alexeyevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Reinforced Concrete Structures  
Samara State Technical University  
(Russia, Samara)

**PANFILOV Denis Aleksandrovich**

Candidate of Technical Sciences, Head of the Department  
Samara State Technical University  
(Russia, Samara)

**MORDOVSKIY Sergey Sergeevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate professor of the Department of Reinforced Concrete Structures  
Samara State Technical University  
(Russia, Samara)

**VASYUCHKIN German Romanovich**

Candidate of technical Sciences, Associate professor  
Samara State Technical University  
(Russia, Samara)

**Abstract.** The article presents the results of the analysis of field experiments and the results of the mathematical description of the parameters of the thermophysical characteristics of concrete and reinforcing steel of reinforced concrete building elements. A mathematical model of the process of changing the thermophysical properties of concrete under conditions of high-temperature heating has been constructed. An exponential function has been proposed, and its main parameters have been obtained to smooth out the experimental dependence of the change in the strength of concrete and reinforcing steel of reinforced concrete structures during their fire resistance testing based on the loss of load-bearing capacity. The thermophysical characteristics of concretes and reinforcement are given under conditions of heating within 100-1000°C. The graphs "degree of heating – coefficient of concrete working conditions for rod and wire reinforcement" are constructed. The method of calculation for fire resistance of a pre-stressed multi-hollow reinforced concrete floor slab is presented. The results of research are used in the development of algorithms and computer programs for calculating the actual fire resistance of reinforced concrete structures.

**Keywords:** reinforced concrete elements; thermophysical characteristics of concrete; coefficients of the working conditions of heated concrete; thermal strength of concrete and reinforcement; mathematical description; fire resistance calculation

**For citation:** Mathematical description and calculations of the thermophysical characteristics of concrete and reinforced steel / N.A. Ilyin, D.A. Panfilov, S.S. Mordovskiy, G.R. Vasyuchkin // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 29-33. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_29.

Целью работы является теоретический анализ натурных экспериментов и математическое описание изменения теплофизических свойств бетона и арматуры железобетонных элементов, используемых при расчете проектных пределов огнестойкости по признаку потери несущей способности. По результатам огневых испытаний бетона и их анализа построена математическая модель процесса изменения теплофизических свойств в условиях пожара.

Сглаживание экспериментальной зависимости  $m_{bt}=f(t, °C)$  изменения нормативного сопротивле-

ния материалов от степени их нагрева проведено экспоненциальной функцией вида:

$$m_{bt} = 1/e^n; n = k \cdot (t/t_{cr})^b; \quad (1)$$

где  $m_{bt}$  – коэффициент условий работы нагретого бетона по сопротивлению сжатию;  $t$  и  $t_{cr}$  – температура нагрева 300–900°C и критическая температура, °C;  $b$  и  $k$  – искомые показатели обработки опыта ( $k = 0,5$ ).

Совмещенные графики  $m_{bt} - t$  представлены на рис. 1 по опытными данным и по формуле (1).

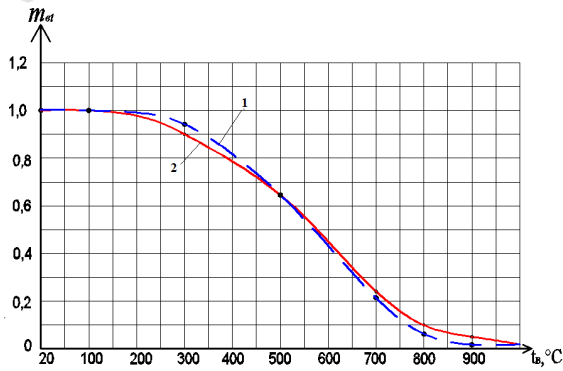


Рисунок 1 – Совмещённый график «степень нагрева – коэффициент условий работы бетона» ( $t_b - m_{bt}$ ): бетон высокопрочный  $t_{cr} = 520\text{ }^\circ\text{C}$  (линии 1 и 2)

Вид бетона и его опытные теплофизические характеристики приведены в таблице 1:

Таблица 1

№ п/п	Виды бетона	$t_{cr},\text{ }^\circ\text{C}$	$m_{bt}$ при температуре $t, \text{ }^\circ\text{C}$				b
			300	500	700	900	
1	Бетон на гранитном щебне высокопрочный ( $R_{bn} = 59\text{ МПа}$ )	520	0,92	0,75	0,4	0,07	3,75
2	Бетон на гранитном щебне обыкновенный ( $R_{bn} = 18\text{ МПа}$ )	575	0,95	0,83	0,6	0,25	4,2
3	Бетон на известняковом щебне	680	0,96	0,86	0,73	0,26	1,2
4	Силикатобетон крупнозернистый	575	0,98	0,9	0,74	0,26	4,9
5	Керамзитобетон	730	0,96	0,86	0,7	0,15	1,65

Примечание – При  $t = 20 \div 100\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m_{bt} = 1$ ; при  $t = 1000\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m_{bt} = 0,01$ .

Для сглаживания опытных данных по бетону принимаем функцию (2):

$$m_{bt} = 1/e^{0.5(t/t_{cr})^b} \quad (2)$$

Для высокопрочного бетона на гранитном щебне ( $R_{bn} = 78\text{ МПа}$ ,  $t_{cr} = 520\text{ }^\circ\text{C}$ ) значения коэффициента условия работы в условиях нагрева приведены в таблице 2.

Таблица 2

№	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	100	300	500	700	800	900	1000
1	$m_{bt}$ , опыт.	1,0	0,91	0,65	0,23	0,10	0,05	0,01
2	$m_{bt}$ , расчёт	1,0	0,94	0,65	0,22	0,08	0,02	0,01

При  $t_{cr} = 520\text{ }^\circ\text{C}$  и  $k = 0,5$  – (искомый показатель степени  $b = 3,75$ ) – расчётная формула (2) имеет вид (3):

$$m_{bt} = 1/e^{0.5(t/520)^{3.75}} \quad (3)$$

где  $t$  и  $t_{cr}$  – температура нагрева бетона и критическая температура,  $^\circ\text{C}$ .

Математическое описание изменения нормативного сопротивления горячекатаной арматурной стали от степени ее нагрева по результатам огневых испытаний представлена в виде следующих показательных функций:

для арматуры класса А240:

$$m_{bt} = 1/e^{0.47(t/t_{cr})^{2.8}} \quad (4)$$

для арматуры класса А300 и А600:

$$m_{bt} = 1/e^{0.47(t/t_{cr})^{3.6}} \quad (5)$$

для арматуры класса А400 и А500:

$$m_{bt} = 1/e^{0.47(t/t_{cr})^{4.4}} \quad (6)$$

где  $m_{st}$  – коэффициент условий работы нагретой стали по нормативному сопротивлению;  $t$  и  $t_{cr}$  – температура нагрева  $100\text{--}1000\text{ }^\circ\text{C}$  и критическая температура,  $^\circ\text{C}$ .

Опытные характеристики нормативного сопротивления горячекатаной арматурной стали приведены в таблице 3.

Таблица 3

№ п/п	Класс арматуры	$t_{cr}, \text{ }^\circ\text{C}$	$m_{st}$ при температуре $t, \text{ }^\circ\text{C}$				n
			200	500	600	700	
1	A240 (A – I)	510	1,12	0,66	0,37	0,15	2,8
2	A300 (A – II)	525	1,02	0,76	0,36	0,16	3,6
3	A400 (A – III)	550	1,05	0,79	0,46	0,18	4,4
4	A500 (A – III B)	520	1,02	0,7	0,33	0,13	2,8
5	A600 (A – IV)	505	1,02	0,64	0,35	0,1	3,6

Примечание – При  $t = 400\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m_{st} = 1,0$ ; при  $t = 850\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $m_{st} = 0,01$ .

Результаты расчёта  $m_{ts}$  для стали А 400;  $t_{cr} = 550\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $n = 4,4$  по формуле (6) и представлены в таблице 4.

Таблица 4

№	$t, \text{ }^\circ\text{C}$	20	200	400	500	$t_{cr}$	600	700
1	$m_{ts}$ , опыт.	1,0	1,05	1,0	0,79	0,625	0,46	0,08
2	$m_{ts}$ , расчёт	1,0	0,99	0,89	0,73	0,625	0,5	0,06

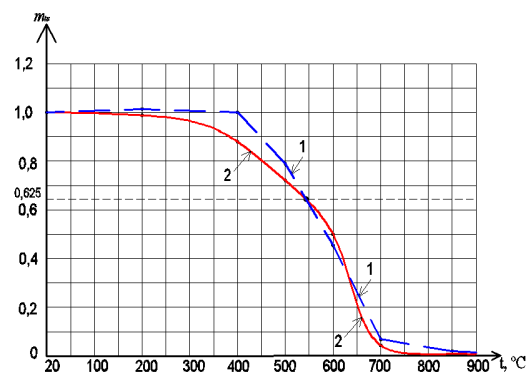


Рисунок 2 – Совмещённый график «степень нагрева – коэффициент условий работы арматурной стали» ( $t - m_{ts}$ ) класса А 400: линии 1 (опыт) и 2 (расчёт)

Совмещённые графики  $t - m_{ts}$  для стали класса А 400 приведены на рис. 2.



Математическое описание изменения нормативного сопротивления высокопрочной арматурной проволоки и канатов от степени ее нагрева по результатам огневых испытаний приведено в виде показательных функций:

для стали класса А800:

$$m_{ts} = 1/e^{0.47(t/500)^{4.2}} \quad (7)$$

для стали класса А1000:

$$m_{ts} = 1/e^{0.47(t/450)^{3.85}} \quad (8)$$

для стали класса В500:

$$m_{ts} = 1/e^{0.47(t/415)^{2.5}} \quad (9)$$

для стали класса В1500:

$$m_{ts} = 1/e^{0.47(t/360)^{2.65}} \quad (10)$$

для стали класса К1500:

$$m_{ts} = 1/e^{0.47(t/365)^{2.48}} \quad (10)$$

где  $m_{st}$  – коэффициент условий работы нагретой стали по нормативному сопротивлению;  $t$  и  $t_{cr}$  – температура нагрева (200 – 700)°С и критическая температура, °С.

Коэффициенты условий работы нагретой проволочной арматурной стали приведены в таблице 5.

Таблица 5

№ п/п	Класс арматуры	$t_{cr}$ , °С	$m_{st}$ при температуре $t$ , °С				$n$ (при $k_s = 0,47$ )
			400	500	600	700	
1	A800 (A – V)	500	0,97	0,625	0,23	0,06	4,2
2	A1000 (A – VI)	450	0,7	0,45	0,2	0,03	3,85
3	B500 (B – I)	415	0,55	0,34	0,07	0,001	2,5
4	B1500 (B – II)	360	0,5	0,31	0,14	0,05	2,65
5	K1500(K – 7)	365	0,5	0,29	0,08	0,02	2,48

Примечание – При  $t = 20 - 100$  °С,  $m_{st} = 1,0$ ; при  $t = 850$  °С,  $m_{st} = 0,01$ .

Таблица 7

Материал	Плотность $\rho_c$ , (кг/м <sup>3</sup> )	Влажность $\omega$ , %	Параметры теплопроводности, Вт/м·°С, и теплоемкости материала, кДж/кг·°С				Показатель термодиффузии, $D_{bm}$ , мм <sup>2</sup> /мин
			$\lambda_0$	$b$	$c_0$	$d$	
1 Тяжелый бетон на известковом щебне	2250	3,0	1,15	- 0,55	0,71	0,84	19,5
2 Тяжелый бетон на гранитном заполнителе	2300	3,0	1,20	- 0,3	0,72	0,82	22,2
3 Песчаный бетон	1930	2,5	1,03	0,35	0,75	0,65	23,2
4 Песчаный бетон	2000	3,0	1,16	0,3	0,75	0,70	25,3
5 Силикатобетон	1850	3,0	0,87	0,12	1,43	0,07	16,5
6 Сталь строительная	7800	0,0	65	- 48	0,44	0,63	461,4
7 Керамзитобетон на керамзитовом песке	1800	5	0,66	0,24	0,84	0,63	18,64
8 Керамзитобетон на кварцевом песке	1200	4	0,41	0,24	0,84	0,65	19,45
9 Перлитобетон	1200	10	0,29	0,24	0,84	0,65	12,2

Примечание – Здесь  $\lambda_0$  и  $c_0$  – соответственно значения теплопроводности, Вт/м·°С, и теплоёмкости, кДж/кг·°С, строительных материалов при  $t_n = 20$  °С;

$b$  и  $d$  – термические коэффициенты теплопроводности и теплоёмкости материалов, умноженные на 1000.

Результаты опыта  $m_{st,опыт}$  и расчета  $m_{st,расч}$  по формуле (11) и приведены в таблице 6.

Таблица 6

№	$t$ , °С	20	200	$t_{cr}=365$	400	500	600	700
1	$m_{st, опыт}$	1,0	0,85	0,625	0,50	0,29	0,08	0,02
2	$m_{st, расч}$	1,0	0,9	0,625	0,55	0,36	0,2	0,09

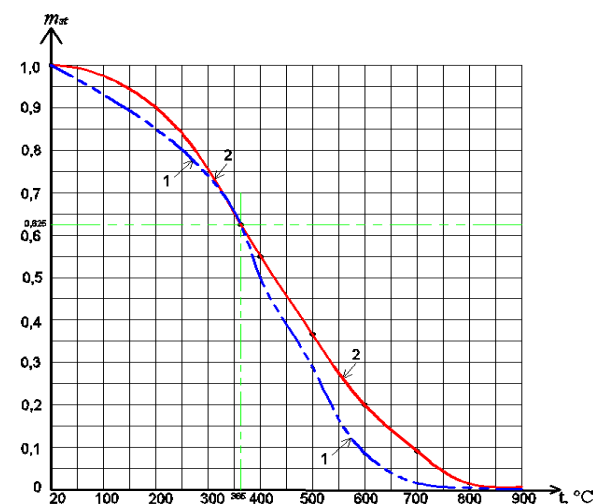


Рисунок 3 – Совмещённый график «температура нагрева – коэффициент условия работы арматуры» ( $t - m_{st}$ ): класса К – 1500 (линии 1 и 2)

Показатели термодиффузии бетона приведены в таблице 7.

Методика расчёта предела огнестойкости железобетонной плиты междэтажного перекрытия – панели многпустотной ПК 60.15 – 8 А<sub>т</sub> ВТ, серия 1.141 – 1, вып. 63 приведен в таблице 8.



Таблица 8

Единичные показатели качества	Условные обозначения, ед. измерения	Величина	Примечания
1. Бетон тяжёлый класса ( $\rho$ , кг/м <sup>3</sup> )	B15	(2300)	ГОСТ 25192 – 2012
2. Показатель термодиффузии для бетона	$D_{bt}$ , мм <sup>2</sup> /мин	22,2	Таблица Б.3 [1]
3. Осевое расстояние (глубина заложения арматуры), мм $a_y = u + 0,5 \cdot d_s = 20 + 14 / 2 = 27$ мм	$a_{min} = a_y$ , мм	27	Рабочие чертежи 1.020 – 1 / 87
4. Показатель условий 1 – стороннего нагрева арматуры в сечении элемента	$m_0$	1,0	Формула (7.25) [1]
5. Степень огнезащиты арматуры $C = 1,44 \cdot m_0 \cdot a_{min} / D_{bt}^{0,8} = 1,44 \cdot 1 \cdot 27 / 22,2^{0,8} = 3,25$	C	3,25	Формула (7.3) [1]
6. Диаметр и класс по прочности рабочей арматуры: $k_s = (0,1 \cdot 16)^{0,05} = 1,017$	$d_s$ , мм  $k_s$	$\emptyset 16$  1,017	4 $\emptyset$ 16 A800
7. Интенсивность силовых напряжений в рабочей арматуре. Уровень ответственности – нормальный	$J_{os}$  $\gamma_H$	0,625  1,0	$J_{os} = \gamma_H \cdot J_H = 1,0 \cdot 0,625 = 0,625$ ФЗ № 384 – 2010
8. Критическая температура нагрева стали в условиях пожара. Степень термотекучести стали	$t_{cr}$ , °C  n	500  4,2	Таблица Б.1 [1]
9. Показатель безопасности элемента: $k = k_0 \cdot k_s = 0,9 \cdot 1,017 = 0,915$	k	0,915	Формула (7.4) [1]
10. Предел огнестойкости плиты по потере несущей способности (R)	$F_{u(R)}$ , мин	70 мин	Формула (7.1) [1]
<i>Решение к п. 10:</i> $F_{u(R)} = (2,15 \cdot \ln J_{os})^{6,6/n} \cdot (t_{cr} / 425)^{6,6} \cdot e^c \cdot k = (2,15 \cdot 0,47)^{1,57} \cdot (500 / 425)^{6,6} \cdot e^{3,25} \cdot 0,915 = 1,02 \cdot 2,92 \cdot 26 \cdot 0,915 \cong 70$ мин			

**Выводы.** Дано математическое описание процесса сопротивления экспериментальных зависимостей термочрезвычайных характеристик тяжелого и легкого бетонов, арматурных сталей современных железобетонных конструкций [2-5].

Результаты математического описания поведения строительных материалов железобетонных конструкций в условиях высокотемпературного воздействия использованы при составлении нормативной документации по теоретическому определению их фактической огнестойкости [1].

#### Библиографический список

1. Стандарт организации. Определение огнестойкости железобетонных конструкций зданий. Методика / состав. Ильин Н.А., Панфилов Д.А. – Самара, 2015. - 82 с.
2. Ильин, Н. А. Последствия огневого воздействия на железобетонные конструкции / Н. А. Ильин. – Москва : Стройиздат, 1979. – 128 с. – EDN TNWTDX.
3. Патент № 2161793 С2 Российская Федерация, МПК G01N 25/50. Способ определения огнестойкости из-

гибаемых железобетонных конструкций здания : № 99103909/28 : заявл. 22.02.1999 : опубл. 10.01.2001 / Н. А. Ильин, М. Б. Пирогов ; заявитель Самарская государственная архитектурно-строительная академия. – EDN NOWKBZ.

4. Патент № 2604820 С1 Российская Федерация, МПК G01N 25/50. способ оценки огнестойкости железобетонной фермы здания : № 2015136088/28 : заявл. 25.08.2015 : опубл. 10.12.2016 / Н. А. Ильин, Д. А. Панфилов ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Самарский государственный технический университет". – EDN WBCLWY.

5. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2015619750 Российская Федерация. Расчёт огнестойкости железобетонной балочной конструкции зданий : № 2015616962 : заявл. 29.07.2015 : опубл. 14.09.2015 / Д. А. Панфилов, Н. А. Ильин ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Самарский государственный архитектурно-строительный университет» (СГАСУ). – EDN JILFAK.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 17.01.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 17.01.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья

УДК 725.4:69.05/.07

ГРНТИ: 67.09 Строительные материалы и изделия

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\_1\_34

### ОЦЕНКА ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ЗДАНИЙ И СООРУЖЕНИЙ НА ОПАСНЫХ ПРОИЗВОДСТВАХ. ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

© Авторы, 2026

SPIN: 4648-9789

**КОЛИНИЧЕНКО Анатолий Федорович**

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры архитектуры  
*Оренбургский государственный университет*  
(Россия, Оренбург)

SPIN: 3532-3166

**ЖАДАНОВ Виктор Иванович**

доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой строительных конструкций  
*Оренбургский государственный университет*  
(Россия, Оренбург, e-mail: volodinvv1994@gmail.com)

SPIN: 9958-5596

**ЛИХНЕНКО Елена Владимировна**

кандидат технических наук, доцент кафедры архитектуры  
*Оренбургский государственный университет*  
(Россия, Оренбург)

SPIN: 8469-1213

**АДИГАМОВА Земфира Сакратовна**

кандидат географических наук, доцент, заведующая кафедрой архитектуры  
*Оренбургский государственный университет*  
(Россия, Оренбург)

**Аннотация.** В статье представлен анализ существующих методик оценки надежности и остаточного ресурса несущей способности эксплуатируемых строительных конструкций. Эти показатели непосредственно связаны с продолжительностью срока службы производственных объектов, прогнозированием технического состояния объекта на данный период, определением эксплуатационных расходов на качественное содержание зданий и сооружений. Квалифицированное, объективное и технически обоснованное определение остаточного ресурса эксплуатируемого строительного объекта является актуальной задачей. Проанализированы преимущества и недостатки известных методик оценки надежности строительных конструкций по критериям прочности, выявленным повреждениям, коэффициентам запаса, срокам эксплуатации, амортизационным отчислениям. Указаны недостатки данных методик. Проанализированы преимущества наиболее эффективной известной методики оценки остаточного ресурса по внешним признакам с акцентом на ее проблемные стороны, связанные с применением субъективных показателей. Предложены направления решения проблемных вопросов.

**Ключевые слова:** остаточный ресурс; несущие конструкции; техническое состояние; экспертиза; здания; сооружения; оценка надежности; износ

**Для цитирования:** Оценка остаточного ресурса производственных зданий и сооружений на опасных производствах. Проблемы и перспективы / А.Ф. Колинченко, В.И. Жаданов, Е.В. Лихненко, З.С. Адигамова // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 34-40. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_34.



Original article

RESIDUAL LIFE ASSESSMENT OF INDUSTRIAL BUILDINGS AND STRUCTURES  
IN HAZARDOUS INDUSTRIES. PROBLEMS AND PROSPECTS

© The Author(s) 2026

**KOLINICHENKO Anatoly Fedorovich**

Doctor of Technical Sciences, professor  
Orenburg State University (Orenburg, Russia)

**ZHADANOV Viktor Ivanovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor,  
Head of the Department of Building Structures  
Orenburg State University (Orenburg, Russia)

**LIKHNENKO Elena Vladimirovna**

Candidate of Technical Sciences,  
Associate professor of the Department of Architecture  
Orenburg State University (Orenburg, Russia)

**ADIGAMOVA Zemfira Sakratovna**

Candidate of Geographical Sciences, Associate Professor,  
Head of the Department of Architecture  
Orenburg State University (Orenburg, Russia)

**Abstract.** This article presents an analysis of existing methods for assessing the reliability and residual life of the load-bearing capacity of operational building structures. These indicators are directly related to the service life of industrial facilities, forecasting the technical condition of the facility over a given period, and determining the operating costs of high-quality maintenance of buildings and structures. A qualified, objective, and technically sound determination of the residual life of an operational building is a pressing issue. The advantages and disadvantages of known methods for assessing the reliability of building structures are analyzed based on strength criteria, identified damage, safety factors, service life, and depreciation charges. The shortcomings of these methods are identified. The advantages of the most effective known method for assessing residual life based on external characteristics are analyzed, with an emphasis on its challenges associated with the use of subjective indicators. Solutions to these issues are proposed.

**Keywords:** residual life; load-bearing structures; technical condition; assessment; buildings; structures; reliability assessment; wear

**For citation:** Residual life assessment of industrial buildings and structures in hazardous industries. Problems and prospects / A.F. Kolinichenko, V.I. Zhadanov, E.V. Likhnenko, Z.S. Adigamova // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 34-40. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_34.

Решение вопросов обеспечения надежности эксплуатируемых зданий и сооружений, связанных, в том числе с адекватной оценкой их остаточного ресурса, является актуальной задачей. Это связано с большим количеством таких строительных объектов, число которых постоянно увеличивается. Как правило, методики оценки надежности строительных конструкций базируются на данных об их фактическом техническом состоянии, которые получают при проведении инструментальных обследований специализированными организациями, имеющими соответствующие допуски и разрешения [1-6].

Проблема безопасной эксплуатации наиболее значима для предприятий, связанных с опасными производствами. Для таких опасных строительных объектов, в соответствии с требованиями п.

36 [7], в результате проведенной экспертизы промышленной безопасности определяют фактическое техническое состояние объекта экспертизы, включая определение остаточного ресурса с указанием установленного срока и условий дальнейшей безопасной эксплуатации здания или сооружения. В связи с этим, заказчики, владеющие опасными производствами, нанимают независимые экспертные организации для того, чтобы иметь четкое представление об их техническом состоянии. За это они платят исполнителям немалые деньги и хотят знать, сколько лет их производства могут безопасно эксплуатироваться.

Однако, получить технически обоснованные и доказательные результаты по этому вопросу зачастую очень сложно, несмотря на применение совре-



менных вычислительных средств для получения искомого результата [8-10]. Несомненно, такая сложность определена многочисленными исходными данными, которые связаны с многообразием конструктивных схем и объемно-планировочных решений зданий и сооружений, применяемыми материалами, из которых выполнены несущие конструкции, климатическими условиями и эксплуатационными характеристиками, особенностями грунтовых условий, сложностями технологических процессов и многих других факторов. Тем не менее, огромная потребность в такой услуге позволила за последние годы сделать большой шаг в этом направлении, но до цели еще далеко.

В настоящее время известно много методов оценки надежности строительных конструкций зданий и сооружений и их остаточного ресурса, основанных на различных критериальных параметрах. К ним можно отнести:

- метод расчета остаточного ресурса по прочности;
- метод расчета остаточного ресурса по износу конструкций (по повреждениям);
- метод расчета остаточного ресурса по срокам эксплуатации;
- метод расчета остаточного ресурса по коэффициенту запаса;
- метод расчета остаточного ресурса по устойчивости (сопоставляется количество допустимых и фактических циклов нагружения конструкций за время эксплуатации здания или сооружения);
- метод расчета остаточного ресурса по нормам амортизационных отчислений и другие.

Наиболее серьезным и чаще всего используемым документом являются «Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам», разработанные специалистами ЦНИИПромзданий в 2001 году [11]. В качестве критерия этих рекомендаций использована величина общей поврежденности  $\varepsilon$ , когда остаточный ресурс здания или сооружения можно рассчитать с учетом результатом проведенного обследования [12] по формуле:

$$\varepsilon = \frac{a_1\varepsilon_1 + a_2\varepsilon_2 + \dots + a_i\varepsilon_i}{a_1 + a_2 + \dots + a_i}, \quad (1)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_i$  – максимальные величины повреждений отдельных конструкций;  $a_1, a_2, \dots, a_i$  – коэффициенты значимости отдельных видов конструкций.

Коэффициенты значимости устанавливаются на основе экспертных оценок в зависимости от степени влияния на живучесть и социально-экономических последствий разрушения отдельных конструкций. Их, как правило, принимают: для плит и панелей перекрытий, покрытий  $a = 2$ , для балок  $a = 4$ , для ферм  $a = 7$ , для колонн  $a = 8$ , для несущих стен и фундаментов  $a = 3$ , для прочих строительных конструкций  $a = 2$ .

Формула (1) позволяет оценить влияние каждого конструктивного элемента на прочностное состояние всего здания или сооружения – чем больше поврежденных конструкций, тем больше значение  $\varepsilon$ . По величине  $\varepsilon$  оценивают относительное повреждение здания или сооружения по формуле (2):

$$\varepsilon = 1 - y; \text{ или } \varepsilon + y = 1, \quad (2)$$

где  $y$  – относительная надежность при эксплуатации, определяемая как:

$$y = \frac{y}{y_0}, \quad (3)$$

где  $y$  – фактический коэффициент надежности;  $y_0$  – общий нормируемый коэффициент надежности.

Таким образом, чем больше относительная надежность  $y$ , тем меньше относительное повреждение  $\varepsilon$ . Данная зависимость приведена в таблице 1.

Таблица 1 – Зависимость относительной надежности от относительного повреждения конструкций

$y$	$\varepsilon$
1	0
0,95	0,05
0,85	0,15
0,75	0,25
0,65	0,35

По своей сути по рассматриваемой методике возможно определить срок эксплуатации исследуемого объекта в годах до капитального ремонта по формуле:

$$t = \frac{0,16}{\lambda}, \quad \text{или до аварийного состояния} \quad t = \frac{0,22}{\lambda},$$

где  $\lambda$  – постоянная износа, измеряемая в единицах, обратных времени, определяется по формуле (4):

$$\lambda = \frac{-l \times n \times y}{t_\phi}, \quad (4)$$

где  $t_\phi$  – срок эксплуатации здания или сооружения в годах, на момент его обследования.

Таким образом, этот метод позволяет по итогам обследования производственного опасного объекта сделать расчет и указать остаточный срок безаварийной эксплуатации. Но, он имеет несколько недостатков, главным из которых является субъективная оценка входных данных – эксперт по своему опыту оценивает значения коэффициентов значимости и величин повреждений отдельных конструкций. Эти параметры являются в большинстве случаев продуктом индивидуального умозаключения порой малоквалифицированного специалиста. Глубинные процессы, протекающие в поровом пространстве материалов даже опытному специалисту (эксперту) неведомы.

Тем не менее, приведенный метод оценки надежности строительных конструкций по внешним признакам в настоящее время является наиболее используемый. Подтверждением сказанному является тот факт, что Ростехнадзор РФ утвердил приказом №



502 от 07.12.2020 г. «Рекомендации к обоснованию остаточного ресурса строительных конструкций объектов использования атомной энергии. РБ-167-20» [13]. Можно задать вопрос, почему принята эта методика? Видимо потому что других методик, дающих более достоверное решение, не существует. Это можно объяснить тем, что нет достоверной информации о внутреннем напряженном состоянии материалов, из которых изготовлены конструкции, нет информации об изменчивости свойств материалов с течением времени, нет информации о пористом строении материалов, что очень важно для железобетона и нет много чего другого. Тем не менее, разработчики документа [11] достойны благодарности за решение этой проблемы, несмотря на указанные недостатки.

В этой связи стоит остановиться на относительно новом методе оценки состояния объектов, суть которого основана на измерении динамических параметров зданий - периодов (частот) и декрементов затухания колебаний. Он доведен до практического применения и используется в качестве приблизительной оценки категории технического состояния зданий и сооружений. ГОСТ Р 31937-2011 [12] в Приложении «Б» в обязательном порядке требует измерения основного тона собственных колебаний вдоль продольной и поперечной осей. Приложение «Г» этого документа требует указать периоды основного тона собственных колебаний и логарифмические декременты затухания колебаний по трем направления (x, y, z), а в приложении «Л» предыдущее и текущее значение этих же параметров.

Поясним суть этих параметров. Каждый осциллятор имеет свой индивидуальный «портрет» - периоды (частоты) и декременты затухания. Эти параметры зависят от особенностей конструкций каждого здания или сооружения в целом и согласно [12] не должны изменяться в процессе эксплуатации более чем на 10 %. В таких случаях повторные измерения производятся регулярно через два года, а в течение эксплуатационного времени объект будет находиться под постоянным наблюдением.

Таким образом, сущность этого метода сводится к сравнению полученных данных параметров колебаний с базовыми, первичными, а критериями безопасности является неизменность этих параметров. При изменении контролируемых параметров более чем на 10 % в ту или иную сторону техническое состояние сооружения подлежит обязательному внеплановому обследованию.

Сущность внепланового обследования сводится к выявлению причин изменения этих параметров. Например, в здании проводилась реконструкция, что может быть связано с надстройкой, перестройкой или с расширением объема, или проводился капитальный ремонт, затрагивающий некоторые несущие конструкции. Тогда изменение частот

или периодов колебаний на величину более 10 % будет объяснимо. Но, если был текущий ремонт или вообще ничего не выполнялось, а частота и декременты поменялись более чем на 10 %, значит что-то произошло со зданием, поменялась его жесткость, которая в первую очередь влияет на колебательные процессы.

Что может быть, когда периоды собственных колебаний увеличились, следовательно, частоты и жесткость здания уменьшилась? Причины могут быть различные - от мелких необратимых процессов в виде трещинообразования в несущих конструкциях до разрушения отдельных элементов, в результате чего произошло перераспределение внутренних усилий, появление дополнительных шарниров в узлах соединения конструкций или что-то случилось с основанием здания, например, произошло поднятие уровня грунтовых вод. В этом и сущность проведения внепланового обследования – найти причину изменения параметров колебательных процессов.

Отметим, что любое техническое обследование является процедурой дорогостоящей по сравнению с методом контроля динамических параметров и с этой точки зрения последний является наиболее привлекательным. В настоящее время действует ГОСТ Р 54859-2011 [14], являющийся основным нормативным документом, определяющим порядок определения параметров основного тона собственных колебаний зданий или сооружений. Он рекомендует периоды собственных колебаний для некоторых гражданских зданий по горизонтальным направлениям (x - y). Но эти значения весьма приблизительны, полученные в результате накопления данных по многим объектам и приводятся в приложении «Ж» [14] для справки. На них ориентироваться не следует, а за исходные показатели необходимо брать данные базового первичного измерения периодов или частот, а также декрементов затухания.

Таблица 2 – Ориентировочные данные о границах диапазона ( $T_1$ ,  $T_2$ ) [14]

Число этажей	Период собственных колебаний, с		
	Крупнопанельные здания	Крупноблочные и кирпичные здания	Каркасные здания
5	0,18 -0,27	0,22-0,35	0,26-0,42
9	0,28-0,44	0,31-0,50	0,46-0,7
12	0,36-0,57	0,39 -0,61	0,61-0,93
14	0,41 -0,65	0,42-0,69	0,71-1,07
16	0,46-0,74	0,47-0,77	0,81-1,22
18	0,51-0,83	0,53-0,85	0,91-1,37
20	0,56-0,91	0,56-0,93	1,01-1,51
22	0,61-0,95	0,60-1,01	1,11-1,656
24	0,66-1,09	0,64-1,09	1,21-1,81
26	0,71-1,17	0,69-1,17	1,31-1,95
28	0,76-1,26	0,73-1,25	1,41-2,10
30	0,81-1,34	0,78-1,33	1,51-2,24



Обратим внимание на то, что этот метод с точки зрения классической механики сомнений не вызывает, является верным, он исключает субъективность в определении колебательных параметров, т.е. идет инструментальное измерение, которое как известно, при четких последовательных действиях специалиста, проводящего замеры, является абсолютно объективным.

ВНИИ по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций в 2003 году разработал свою методику, в основу которой также положены итоги измерений параметров собственных колебаний зданий или сооружений [15]. Он рекомендует по результатам записей частот, периодов колебаний по нескольким тонам строить эпюры относительных ускорений, по которым возможно выявление мест расположения дефектов по высоте зданий, сооружений и в плане, а также установление степени связи зданий или сооружений с грунтами.

Данная методика позволяет также оценивать степень повреждения объекта и ожидаемые периоды колебаний. Для этого полученные результаты записей периодов необходимо сравнить с ожидаемыми, определенными по эмпирической формуле (5):

$$[T] = a \times n, \quad (5)$$

где  $n$  – количество этажей;  $a$  – коэффициент, зависящий от конструкции здания и вида его основания, принимаемый по таблице 3.

**Таблица 3 – Коэффициент здания**

№	Тип здания	Коэффициент $a$
1	Жилые крупнопанельные здания	0,045
2	Жилые здания с несущими кирпичными, каменными и крупноблочными стенами	0.056
3	Школьные и другие здания с большими проемами	0.065
4	Каркас из монолитного железобетона с кирпичным или легкобетонным заполнением стен	0,064
5	Каркас стальной	0,08

Увеличение зарегистрированных периодов собственных колебаний  $T_{xy}$  по направлениям  $x$  -  $y$  по отношению к ожидаемым  $[T_{xy}]$  в определенное количество процентов позволяет делать заключение о степени поврежденности объекта (таблица 4).

**Таблица 4- Определение степени повреждения объектов**

Увеличение периода собственных колебаний, %	Степень повреждения
0-10	1– без повреждений, легкая
11-30	2 – умеренная
30- 60	3 – сильная
61-90	4 –тяжелая
91 -100	6 – катастрофическая

Обе методики, использующие записи параметров собственных колебаний, можно было бы широко использовать. Но, в практических целях они используются относительно редко, чаще всего на уникальных объектах гражданского назначения повышенной этажности. К тому же, глубина проработки этих методик недостаточна, а самое главное они не указывают причину изменения динамических параметров колебаний. Вновь исследователь (эксперт) должен заниматься поисками причин такого явления, а это снова субъективное решение. Более того, ГОСТ Р 31937-2011 [12] с мая 2021 года не является документом для обязательного исполнения, он носит в настоящее время рекомендательный характер. Фактически это означает, что требования [12] относительно измерения периодов основного тона сооружения и его декрементов затухания никто выполнять не будет, за исключением возможно отдельных уникальных объектов. Как показывает наша многолетняя практика, на промышленных объектах по большому счету их никто и не делал.

Но жизнь не стоит на месте. Мировая и отечественная наука работают над этой проблемой и метод измерения параметров собственных колебаний непременно займет свое достойное место в вопросах оценки напряженного состояния конструкций и остаточного ресурса объектов, потому что с точки зрения механики колебаний она абсолютно верна. Представляется что в недалеком будущем она без понуждения государственных органов найдет широкое применение в строительном деле.

В этой связи следует остановиться на документе [12], имеющем несколько предназначений и одно из них – проведение работ по обследованию технического состояния зданий и сооружений для оценки возможности их дальнейшей безаварийной эксплуатации или необходимости восстановления и усиления конструкций. В области обследования промышленных зданий и сооружений он оказался абсолютно непригодным и тем более в области опасных производственных объектов. В нем даже ни разу не употребляется словосочетание «промышленная безопасность». Но видимо потому, что этот ГОСТ Р 31937-2011 дважды включался в Постановления Правительства РФ №1521 от 26.12.2014 г. и №1307 от 07.12.2016 г. (перечень национальных стандартов и сводов правил, применение которых необходимо на обязательной основе), его в отдельных случаях пытались «приспосабливать» под объекты промышленной безопасности. И только лишь в 2021 году Постановлением Правительства РФ №815 от 28.05.2021 г.) этот стандарт выведен за пределы этого перечня, что представляется совершенно правильным и справедливым.

В дальнейшем экспертные организации стали работать по приказам Ростехнадзора РФ, которые



периодически выходили и утверждали Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности. Последний из них от 20.10.2020 г. утвердил «Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы». Этот документ прописывает в основном организационные вопросы и почти не уделяет внимания техническим. Хорошо это или плохо? Считаем, что для эксперта хорошо, его действия в части технических решений не повязаны обязательными установками. Для дела плохо, потому что это позволяет совершать различные манипуляции, идущие во вред безопасности. Более того, организационные вопросы тоже вызывают сомнения.

Но, вернемся к методу оценки состояния объектов путем измерения их динамических параметров. Представляется, что обстоятельства заставят в недалеком будущем разрабатывать индивидуальные методики, предназначенные для производственных объектов, в том числе опасных. Они будут в значительной мере отличаться от существующих, предназначенных для гражданских зданий по следующим обстоятельствам.

1. В связи с тем, что производственные одноэтажные здания, как правило, имеют относительно небольшую высоту, и достаточно большие габаритные размеры в плане очевидно, что измерение их динамических параметров будет сопряжено с определенными сложностями. В этой связи видится два аспекта. Первый – представляется нецелесообразным измерение колебаний по вертикальному направлению. Второй – колебания температурных блоков производственных зданий или сооружений по направлениям  $x$  -  $y$  потребуют учета взаимного их влияния по температурным или деформационным швам, что представляется весьма сложной проблемой.

2. Ввиду относительно небольшой высоты одноэтажных производственных зданий видимо достаточно ограничиваться только первой формой колебаний, но проблемы несовпадения центров жесткости и масс потребует разработки специальной методики, учитывающей крутильные колебания в пределах отдельных температурных (деформационных) блоков. В том числе потребуются методика выбора точек расстановки датчиков, регистрирующих вращательные колебания.

3. Для производственных зданий регистрация собственных колебаний безусловно будет усложнена фоновыми колебаниями, генерируемыми работающим технологическим оборудованием. Потребуется решение этой проблемы.

4. Изменение физико-механических свойств грунтов под влиянием таких внешних факторов, как: динамические и вибрационные воздействия, генерируемые технологическим оборудованием, изме-

нение коэффициента пористости, удельного сцепления и др. в результате длительной эксплуатации объектов, повышение влажности и уровня грунтовых вод, разжижение грунтов и др., которые могут изменяться в межрегламентный период измерений, способны быть причиной серьезных изменений динамических параметров колебаний зданий. В силу недостаточности изученности этих вопросов потребуются большая работа и время по созданию научно-обоснованной нормативной базы, учитывающей эти факторы. По этой причине, на первом этапе можно было бы ограничиться измерением динамических параметров колебаний отдельных выборочных конструктивных элементов, имеющих повышенную степень конструктивной ответственности.

### Библиографический список

1. Гула Д.Н., Головчинский В.О. Прогнозирование технического состояния сложных технических комплексов на основе экспертной информации // Известия Тульского гос. ун-та. Технические науки. 2021. №3. С. 260-264.
2. Оценка постоянной физического износа железобетонных элементов и конструкций для различной агрессивности эксплуатационной среды / А. А. Васильев [и др.] // Наука, общество, образование в эпоху цифровизации и глобальных изменений : [монография] / М. Н. Алешина [и др.] ; под общ. ред. Г. Ю. Гуляева. – Пенза : Наука и Просвещение, 2022. – Разд. II. Гл. 7. – С. 94–108.
3. Гордеева О.Г. Расчетно-экспериментальные методы экспресс-оценки физического износа и остаточного ресурса зданий и сооружений: диссертация кандидата технических наук: 05.26.02. – Новогорск, 2002. – 142 с.
4. Черных А.Г., Корольков Д.И., Данилов Е.В., Казакевич Т.Н., Коваль П.С. Оценка гамма-процентного ресурса деревянных конструкций по величине физического износа // Жилищное строительство. 2022. № 4. С. 66–71.
5. Смоляго Г. А., Фролов Н.В. Современные подходы к расчету остаточного ресурса изгибаемых железобетонных элементов с коррозионными повреждениями // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2019. Т. 21, № 6. С. 88-100.
6. Корольков, Д. И. Оценка остаточного ресурса строительных конструкций: монография / Д. И. Корольков. – Санкт-Петербург: СПбГАСУ, 2020. – 168 с.
7. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности «Правила проведения экспертизы промышленной безопасности» Утверждены приказом РТН № 420 от 20.10.2020 г.
8. Рябинин И. А., Струков А. В. Решение одной задачи оценки надежности структурно-сложной системы разными логико-вероятностными методами // Сб. тр. 15-й Междунар. науч. конф. «Моделирование и анализ безопасности и риска в сложных системах» (МАБР-2019). 2019. С. 1-14.
9. Нозик А. А., Струков А. В., Можаяева И. А. Программная реализация методов количественного анализа риска аварий опасных производственных объектов на основе логико-вероятностного и логико-детерминированного подходов // Наука и безопасность. 2016. № 2 (20). С. 25-35.



10. Струков А. В. Логико-вероятностное моделирование надежности систем из элементов с тремя состояниями с использованием программного комплекса «АР-БИТР» // Проблемы анализа риска. 2014. Т. 11, № 3. С. 78-85.

11. Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций по внешним признакам. ЦНИИ-Промзданий, М., 2001 г.

12. ГОСТ Р 31937-2011. Здания и сооружения Правила обследования и мониторинга технического состояния. Дата актуализации: 01.01.2021.

13. РБ-167-20. Рекомендации к обоснованию остаточного ресурса строительных конструкций объектов использования атомной энергии. М., 2020 г.

14. ГОСТ Р 54859-2011. Здания и сооружения Определение параметров основного тона собственных колебаний.

15. Методика оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений. - МЧС России. ВНИИ по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций. М., 2003 г.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 15.02.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 15.02.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья  
УДК 691.342:691.537  
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_41

### СРАВНЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗОЛЬНОЙ КЕРАМИКИ, ПОЛУЧЕННОЙ РАЗНЫМИ СПОСОБАМИ ФОРМОВАНИЯ

© Автор, 2026  
SPIN: 6265-0930

**МАКАРЕНКО Сергей Викторович**  
кандидат технических наук, доцент  
*Иркутский национальный исследовательский технический университет*  
(Россия, Иркутск, e-mail: makarenko\_83\_07@mail.ru)

**Аннотация.** Проведено сравнение физико-механических характеристик образцов-сырцов и образцов керамики, полученных на их основе методами пластического формования и полусухого прессования из золы гидроудаления ТЭЦ-10. Физико-химические и структурные характеристики золы гидроудаления ТЭЦ-10, как и данные, используемые в статье для сравнения, представлены в рядереанее опубликованных нами работ [1-3]. В результате проведенных исследований установлено, что ключевым фактором влияния, обеспечивающим формовочные свойства ЗГУ, является ее удельная поверхность; вслед за ней, в зависимости от способа формования, весьма значимым фактором для полусухого метода – двусторонне прессование смеси, а в случаи пластического формования – оптимальное содержание органических добавок – модификаторов. Прочность сырца, высушенного до постоянной массы, в зависимости от условий его формования и компонентного состава, может изменяться от 1,9 до 3,46 МПа соответственно. Оценивая значимость влияний факторов на физико-механические характеристики керамического черепка установлено, что ключевыми факторами, в данном случаи, являются удельная поверхность золы гидроудаления и температура обжига изделия, влияние условий формования на итоговых характеристиках проявляется в меньшей степени. Так если за основной критерий качества принять прочность при сжатии, то ее изменение, в зависимости от удельной поверхности золы гидроудаления и температуры обжига, может варьироваться от 15,7 до 94,3 МПа соответственно. Достигнутые физико-механические характеристики в полной мере отвечают требованиям ГОСТ 530-2019 Кирпич и камень керамический. Общие технические условия иуказывают на принципиальную возможность получения изделий широкой номенклатуры, как методом полусухого прессования, так и методом пластического формования.

**Ключевые слова:** золы гидроудаления; зольная керамика; золы ТЭЦ; прочность керамического черепка; фазовый состав зол

**Для цитирования:** Макаренко С.В. Сравнение физико-механических характеристик зольной керамики, полученной разными способами формования // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 41-46. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_41.

Original article

### COMPARISON OF THE PHYSICO-MECHANICAL CHARACTERISTICS OF ASH CERAMICS OBTAINED BY DIFFERENT MOLDING METHODS

© The Author(s) 2026

**MAKARENKO Sergey Viktorovich**  
Candidate of Sciences (Technical), Associate Professor  
*Irkutsk National Research Technical University*  
(Russia, Irkutsk)

**Abstract.** A comparison of the physical and mechanical characteristics of raw samples and ceramic samples obtained on their basis by plastic molding and semi-dry pressing from TPP–10 hydraulic extraction ash has been carried out. The physico-chemical and structural characteristics of the TPP-10 hydraulic extraction ash, as well as the data used in the article for comparison, are presented in a number of previously published papers [1-3]. As a result of the conducted research, it was found that the key influence factor ensuring the molding properties of the mold is its specific surface area, followed by, depending on the molding method, a very significant factor for the semi-dry method - double-sided pressing of the mixture, and in cases of plastic molding, the optimal content of organic additives- modifiers. The strength of the raw material dried to a constant weight, depending on the conditions of its molding and component composition, can vary from 1.9 to 3.46 MPa, respectively. Assessing the signifi-



cance of the influence of factors on the physico-mechanical characteristics of a ceramic shard, it was found that the key factors in this case are the specific surface area of the hydraulic extraction ash and the firing temperature of the product, the influence of molding conditions on the final characteristics is less pronounced. So, if compressive strength is taken as the main quality criterion, then its change depending on the specific surface area of the hydraulic extraction ash and the firing temperature can vary from 15.7 to 94.3MPa, respectively. The achieved physical and mechanical characteristics fully meet the requirements of GOST 530-2019 Ceramic brick and stone. The general technical conditions indicate the fundamental possibility of obtaining products of a wide range, both by semi-dry pressing and by plastic molding.

**Keywords:** hydraulic extraction ash; ceramic ash; thermal power plant ash; ceramic shard strength; phase composition of the ash

**For citation:** Makarenko S.V. Comparison of the physico-mechanical characteristics of ash ceramics obtained by different molding methods // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 41-46. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_41.

**Введение.** Иркутская область, как и многие другие регионы России, ТЭЦ которых функционируют на твердом топливе, столкнулась с «давно назревающей и одновременно внезапно возникшей» проблемой утилизации твердотопливных отходов – зол ТЭЦ, накопление которых составляет в регионе более 90 млн тонн. Безусловно, теплоэнергетики могли бы пойти по пути расширения и углубления золоотвалов, в том случае, если бы этот шаг не предполагал огромных на проведения этого мероприятия капиталовложений и законодательного сдерживания. Однако, широкомасштабная реконструкция золоотвалов ввиду их конструктивных особенностей невозможна, а строительство новых – высокозатратно и многодельно. Вынужденный увеличенный объем теплогенерации, связанный с возрастающим спросом на тепловую и электрическую энергию по причине интенсивного притока населения из районов области областному центру и его пригороду, создает дополнительные трудности, как с удовлетворением спроса на тепловую и электрическую энергию, так и со сложностью принятия взвешенного решения, направленного на поиски эффективных технологий, позволяющих переработать золошлаковые отходы, выход которых на сегодняшний день в регионе составляет более 1,5 млн тонн в год. Как уже отмечалось в ряде работ [4 – 17], промышленность строительных материалов является наиболее емкой отраслью, способной осуществить переработку накопленных и вновь образующихся золошлаковых отходов. Кроме того, именно отрасль промышленности строительных материалов может являться эффективным инструментом реализации, например, Федерального проекта «Экономика замкнутого цикла» и Постановления Правительства Российской Федерации №1557-р от 15.06.2022г., в котором указывается необходимость сокращения накопленных отходов от сжигания твердого топлива в два раза к 2035 г. В промышленности строительных материалов Российской Федерации функционируют производства, выпускающие широкую номенклатуру строительной керамики используя разные принципы производства. В частности, в Иркутской области функционирует завод по производству строительной

керамики по технологии пластического формования. В ранее проведенных нами исследованиях показана принципиальная возможность использования зол гидроудаления в качестве самостоятельного сырья для производства строительной керамики методом пластического формования и полусухого прессования. Все же для принятия проектного решения по интеграции сырья в существующее производство или в случае реализации вновь образованного, может быть интересна и весьма полезна информация, позволяющая провести сравнение достигнутых физико-механических характеристик керамического черепка в зависимости от условий их формования с целью прогнозирования выпуска возможной номенклатуры продукции. Учитывая выше сказанное, основной целью нашей работы являлась сравнительная оценка физико-механических характеристик сырья, полученного пластическим формованием и полусухим прессованием и керамического черепка на их основе.

**Материалы и методы.** При проведении исследований использовали золу гидроудаления Иркутской области ТЭЦ-10, далее ЗГУ. Значение удельной поверхности ЗГУ было принято  $S_{уд}=6000\text{см}^2/\text{г}$  [1] и достигнуто путем сухого помола в вибрационно-шаровой мельнице СВМ-3. Удельную поверхность измеряли при помощи прибора Ходакова ПСХ-12. Для изготовления образцов методом пластического формования процентное содержание органических добавок модификаторов составляло: эфир целлюлозы НМР-150– 0,3%, редиспергируемый полимерный порошок DA-1400 – 3% от массы ЗГУ, водосодержание смеси 35%. Для изготовления образцов методом полусухого прессования водосодержание составляло 10% от массы ЗГУ. Подготовка состава для пластического формования заключалась в последовательном смешивании ЗГУ с добавками-модификаторами, а затем в повторном смешивании с требуемым количеством воды. Для подготовки состава для полусухого прессования предусматривалась одна стадия, заключающаяся в перемешивании ЗГУ и воды в вышеприведенном соотношении. Смешивание составов производилось в смесителе принудительного действия EO95N (Matest). Изготовление образцов-



Рис. 1. Машина для формования образцов асфальтобетона ПО-500



Рис. 2. Лабораторный экструдер ЭМ-1В



Рис. 3. Образцы-сырцы, высушенные до постоянной массы, полученные при полусухом прессовании



Рис. 4. Образцы-сырцы, высушенные до постоянной массы, полученные на лабораторном экструдере ЭМ-1В

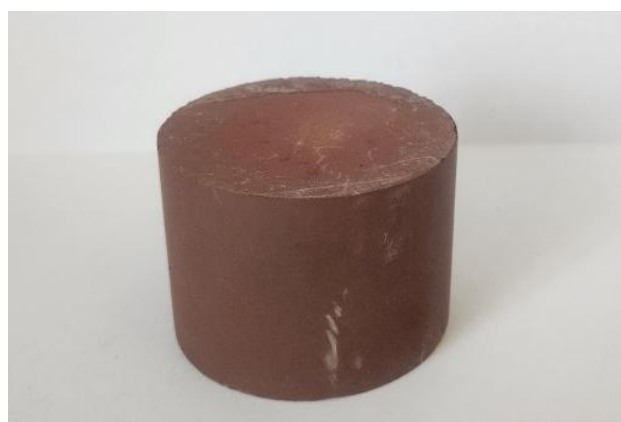


Рис. 5. Керамические образцы, полученные полусухим прессованием при температуре обжига 1050°C, 1150°C и 1180°C.



Рис. 6. Керамические образцы, полученные пластическим формованием при температуре обжига 1050°C, 1150°C и 1180°C



Рис. 7. Твердомер ТЭМП-2

сырцов методом полусухого прессования производилось с использованием машины для формования асфальтобетона ПО-500 (рис. 1), для пластического формования использовали лабораторный экструдер ЭМ-1В (рис. 2). Далее, оценивались физико-механические свойства сырцов в сухом состоянии (рис. 3, рис. 4) и керамических черепков (рис. 5, рис. 6), полученных на их основе. Температура обжига образцов составляла  $t = 1050^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 1150^{\circ}\text{C}$ ,  $t = 1180^{\circ}\text{C}$  и  $t = 1210^{\circ}\text{C}$ . Основные физико-механические характеристики керамического черепка оценивали по ГОСТ 530-2019 Кирпич и камень керамический. Общие технические условия. В дополнение к основным показателям качества керамического черепка проводилась оценка твердости образцов с последующим ее сравнением с твердостью горных пород, которая, как известно, преимущественно охарактеризована шкалой Мооса. Предварительно были отобраны горные породы осадочного происхождения: мрамор, магматического происхождения, в том числе габро, гранит и нифрит с заранее известной по справочным данным относительной твердостью по шкале Мооса. Далее с помощью твердомера (рис. 7) по шкале Бринелля и Роквелла оценивалась твердость выше приведенных образцов горных пород и полученных при разной температуре обжига образцов керамики. Затем устанавливалась корреляционная связь между шкалой относительной твердости (Мооса) и шкалами (Бринелля и Роквелла). Принцип измерения твердости прибором ТЭМП-2 – динамический, основанный на определении соотношения скоростей падения и отскока ударника датчика, которое преобразуется электронным блоком в условные единицы, затем по соответствующему алгоритму пересчитываются микропроцессором прибора в числа твердости HB, HRC.

**Результаты и обсуждения.** При сравнении физико-механических характеристик сырца, полученного при пластическом формовании и полусухом прессовании, установлено, что плотность образцов после формования имеет близкие значения, однако, после высушивания образцов до постоянной массы, плотность образцов имеет более значимое различие. Прочность образцов, полученных пластическим формованием практически вдвое выше прочности, полученной полусухим прессованием 1,9 МПа и 3,46 МПа соответственно. Такая весьма значимая разница обусловлена содержанием в составе добавок – модификаторов эфир целлюлозы HMR-150 и редицергируемого полимерного порошка DA-1400, которые в процессе сушки остекловываются и создают пространственный каркас, обеспечивающий прочность сырца. Необходимо отметить, что при проведении сушки образцов в одинаковых режимах с достаточно высоким темпом повышения температуры до  $105^{\circ}\text{C}$ , в частности,  $0,5^{\circ}\text{C}/\text{мин}$ , видимых дефектов



**Таблица 1 – Физико-механические характеристики сырца и керамического черепка, полученного при разных температурах обжига и условиях формования**

Условие формования	Максимальная температура обжига, °С	W водопоглощение зольного черепка по массе, %	R прочность зольного черепка на сжатие, МПа	ρ плотность зольного черепка, кг/м³	ρ плотность образца сырца, кг/м³	ρ плотность образца сырца в сухом состоянии, кг/м³	R прочность сырца, в сухом состоянии на сжатие, МПа	Относительная твердость по шкале Мооса
Полусухое прессование	1210	2,6	94,3	2430	1835	1650	1,9	7
	1180	3,2	75,4	2307				6
	1150	14,8	44,3	1844				4
	1050	25,2	17,8	1495				Менее 4
Пластическое формование	1180	2,9	67,4	2290	1820	1280	3,46	не оценивалась
	1150	17,8	36,8	1830				
	1050	27,6	15,7	1470				

Примечание: результаты получены с использованием ЗГУ ТЭЦ-10 с  $S_{уд}=6000\text{см}^2/\text{г}$ , в таблице представлены средние значения партии из шести образцов, полученных при выше указанных температурах. Относительная твердость по шкале Мооса керамических образцов установлена корреляцией между шкалами Бринелля и Роквелла

в структуре сырцов, полученных полусухим прессованием и пластическим формованием, не наблюдалось (рис. 3, рис. 4). Установленный факт указывает о конструктивном влиянии органических добавок на чувствительность к сушке образцов, несмотря на достаточно высокое водосодержание смеси 35%, и позволяет в значительной степени сократить самый долговременный процесс при производстве керамических изделий методом пластического формования – процесс сушки, тем самым, увеличить производительность, сократить экономические издержки и, в целом, повысить экономическую эффективность производства. Далее, после проведении обжига образцов при выше приведенных значениях температуры, были определены и сравнены основные физико-механические характеристики образцов керамики, в том числе: прочность на сжатие, плотность, водопоглощение и твердость образцов. В результате сравнения установлено, что физико-механические характеристики керамических черепков, полученных при пластическом формовании и полусухом прессовании, обжиг которых проводился при равнозначных температурах, не имеют весьма существенного различия, которое составляет около 10% (табл. 1). При проведении исследований твердости керамических образцов, полученных при разной температуре об-

жига, установлено, что увеличение твердости происходит с увеличением температуры обжига образцов, и в зависимости от ее значения может быть соотносима с относительной твердостью горных пород по шкале Мооса (табл. 2).

**Таблица 2 – Твердость некоторых горных пород и керамического черепка, полученного при разных температурах обжига**

Наименование образца	Твердость по шкале Бринелля	Твердость по шкале Роквелла	Относительная твердость по шкале Мооса
Гранит	580	58	7
Габро	520	47	6
Нифрит	460	30	6
Мрамор	310	25	4
Керамический черепок (t обжига 1050°С)	230	17	Менее 4
Керамический черепок (t обжига 1150°С)	320	27	4
Керамический черепок (t обжига 1180°С)	480	45	6
Керамический черепок (t обжига 1210°С)	600	62	7

**Заключение.** В результате проведенного сравнительного анализа физико-механических характеристик сырца, установлено, что прочность сырца, полученного пластическим формованием и высушенным до постоянной массы, несмотря на меньшую плотность практически вдвое превышает прочность сырца, полученного полусухим формованием. Ключевым фактором, оказывающим влияние на прочность, являются оптимально подобранные добавки- модификаторы эфир целлюлозы HMR-150 и релаксифицируемый полимерный порошок DA-1400, которые, в свою очередь, помимо обеспечения формовочных свойств ЗГУ и сырцовой прочности, создают благоприятные условия для проведения сушки сырца винтентивном режиме без появления видимых дефектов структуры. Низкая чувствительность к сушке сырца позволяет оптимизировать самый затратный по времени процесс при производстве керамики методом пластического формования, тем самым увеличивая производительность и, как следствие, снижая экономические издержки производства. Сравнив итоговые физико-механические характеристики керамических черепков, полученных разными способами формования, установлено, что принцип формования, не оказывает существенного влияния на их итоговые значения, ключевым фактором, в данном случае, является температура обжига образцов. Достигнутые значения основных показателей качества керамических черепков, полученных пластическим формованием и полусухим прессованием, такие как прочность на сжатие, плотность керамического черепка и водопоглощение, имеют схожие характеристики, отклонение которых составляет около 10%. Поскольку долговечность разрабатываемых минеральных композитов главным об-



разом оценивается их структурой, которую возможно охарактеризовать в том числе и твердостью. В проведенной нами работе производилась оценка твердости керамического черепка с дальнейшим установлением возможной корреляционной связи ключевого фактора, оказывающего на нее влияния. Установлено, что твердость керамического черепка, как и прочность, неразрывно связана с температурой его обжига и в зависимости от ее значения может изменяться по шкале Мооса от 7, что сравнимо с гранитом, до значения менее 4, чему соответствуют осадочные горные породы. По результатам исследований можно сделать обоснованный вывод о возможном выпуске строительной керамики разной номенклатуры как методом пластического формования, так и методом полусухого прессования, на что указывают полученные физико-механические характеристики, в том числе кирпич и керамический камень, элементы мощения, керамическая плитка, керамогранит и т.д.

#### Библиографический список

1. Макаренко С.В., Гонжитов А.Б., Хозин В.Г. Перспективы применения зол гидроудаления Иркутской области в качестве основного сырья для производства строительной керамики // *Строительные материалы*. 2025. № 4. С. 45–51. DOI: 10.31659/0585-430X-2025-834-4-45-51.
2. Макаренко С.В., Хозин В.Г. Перспективы применения зол гидроудаления как основного сырья при производстве строительной керамики методом пластического формования // *Строительные материалы*. 2025. № 12. С. 27–32. DOI:10.31659/0585-430X-2025-842-12-27-32.
3. Макаренко С.В., Гонжитов А.Б., Хозин В.Г. Изменение физико-механических свойств сырца и керамического черепка, полученных из зол гидроудаления, в зависимости от конструктивных особенностей прессового оборудования // *Техника и технология силикатов*. 2025. Том 32, С. 230 – 238. DOI: 10.62980/2076-0655-2025-230-238.
4. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // *Экология и промышленность России*. 2019. № 1. С. 77–87. EDN: MNEMXS. <http://doi.org/10.24411/1728-323X-2019-14077>.
5. Макаров Д.В., Мелконян Р.Г., Суворова О.В., Кумарова В.А. Перспективы использования промышленных отходов для получения керамических строительных материалов. // *Горный Информационно- Аналитический Бюллетень (научно-технический журнал)* 2016. №5. С. 254-281. EDN:VTOBUT.
6. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В., Паринов И.А. Использование техногенного сырья в технологии керамики // *Открытая керамика*. 2024. Т. 18. С. 100578. EDN: WOQESR. <http://doi.org/10.1016/j.oceram.2024.100578>.

7. Нурпеисова М., Нурлыбаев Р., Орынбеков Ю., Искаков А. Исследование и использование золошлаковых отходов для производства строительных материалов // *Горный журнал Казахстана*. 2024. № 3. С. 35–40. DOI: 10.48498/minmag.2024.227.3.003.

8. Буравчук Н.И., Гурьянова О.В. Использование техногенного сырья в технологии керамического кирпича // *Инноватика и экспертиза*. 2020. № 2 (30). С. 160–169. EDN: ANHZCK. <http://doi.org/10.35264/1996-2274-2020-2-160-169>.

9. Абдрахимова Е.С. Образование золы легкой фракции и использование ее в производстве плиток для полов // *Строительные материалы*. 2019. № 11. С. 64–66. EDN: EAPQLA. <http://doi.org/10.18796/0041-5790-2019-11-64-66>.

10. Гурьева В.А., Дорошин А.В. Применение золошлаковой керамики для малоэтажного строительства // *Строительные материалы*. 2022. № 4. С. 6–10. EDN: QMTBDJ. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2022-801-4-6-10>.

11. Минакова П.С., Таскин А.В., Надточий И.И. Производство высокопрочной керамики из золошлаковых отходов // *Тенденции развития науки и образования*. 2021. № 10. С. 105–107. EDN: NSNYMX. <http://doi.org/10.18411/trnio-10-2021-69>.

12. Столбоушкин А.Ю., Истерин Е.В. Исследование золы уноса Западно-Сибирской ТЭС как потенциального сырья для получения керамики // *Качество. Технологии. Инновации. Материалы VI международной научно-практической конференции*. Новосибирск, 2023. С. 96–103. EDN: PXPAPA.

13. Столбоушкин А.Ю., Истерин Е.В., Фомина О.А. Использование отходов теплоэнергетики для снижения средней плотности стеновых керамических материалов с матричной структурой // *Строительные материалы*. 2024. № 4. С. 13–19. EDN: TPRBIP. <http://doi.org/10.31659/0585-430X-2024-823-4-13-19>.

14. Хуан Ю.-М., Чэнь К.-С., Чэнь К.-С., Лай Дж.-В. Использование промышленной золы и шлама в производстве кирпича и повышение качества // *Материалы*. 2024. Т. 17, № 11. С. 2568. <http://doi.org/10.3390/ma17112568>.

15. Кушиоровски Р., Герле А., Дудек К., Звязек К. Применение остатков сгорания каменного угля в производстве керамических строительных материалов // *Construction and Building Materials*. 2021. Т. 304. С. 124506. EDN: IJWWNI. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124506.

16. Дакуба Дж., Сифриан Э., Ромеро М., Льяно Т., Андрус А. Влияние несгоревшего углерода на эколого-технические характеристики обожженных глиняных кирпичей с золой-уносом // *Прикладные науки*. 2022. Т. 12, № 8. С. 3765. DOI: 10.3390/app12083765.

17. Арыкбаев К.Б. Разработка составов и технологии производства керамических материалов на основе золошлаковых отходов ТЭЦ; дис. канд. техн. наук. Бишкек: Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры, 2020. 147 с. URL: <https://arch.kyrlibnet.kg/uploads/KGUSTA.ARYKBAEV%20KANATBEK%20BAJYSHBEKOVICH.2020.DISS.pdf>.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 27.01.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 27.01.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья

УДК 69

ГРНТИ: 67.09 Строительные материалы и изделия

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

doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_47

## АНАЛИЗ ИССЛЕДОВАНИЙ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С КОМПОЗИТНОЙ СТЕРЖНЕВОЙ АРМАТУРОЙ

© 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)

**ЖИЛЯЕВ Андрей Александрович**

магистр  
*Курский государственный университет*  
(Россия, Курск)

**ГОРОХОВ Иван Александрович**

студент  
*Курский государственный университет*  
(Россия, Курск)

**Аннотация.** Повышение долговечности железобетонных конструкций решается, в том числе применением неметаллической композитной арматуры. В этой связи актуальны совершенствование и разработка методов проектирования бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой. Рассмотрены основные направления применения неметаллической композитной арматуры в бетонных конструкциях. Показано, что основным фактором, обеспечивающим надежность конструкции, является сцепление композитной стержневой арматуры с бетоном. Использование композитной арматуры в бетонных конструкциях требует обеспечения огнестойкости таких конструкций. Огнестойкость композитной арматуры определяется температурой размягчения матрицы композитного стержня. Определена номенклатура конструкций, в которых возможно применение стержневой композитной арматуры с обеспечением нормативных требований по пределу огнестойкости. Выполнен анализ экспериментальных исследований изгибаемых конструкций с композитной стержневой арматурой. Предлагается для обеспечения прочности изгибаемых элементов по наклонным сечениям выполнить отгиб стержней рабочей продольной рабочей арматуры, предложены геометрические параметры отгибов для некоторых видов композитной арматуры в зависимости от диаметра стержня.

**Ключевые слова:** композитная арматура; методы испытания; сопротивление; сцепление; огнестойкость; отгибы стержней; предварительное напряжение

**Для цитирования:** Меркулов С.И., Горохов И.А., Жиляев А.А. Анализ исследований бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 47-52. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_47.

Original article

## RESEARCH ANALYSIS OF CONCRETE STRUCTURES WITH COMPOSITE REINFORCEMENT BAR

© 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)

**ZHILYAYEV Andrey Aleksandrovich**

Master's Degree  
*Kursk State University*  
(Russia, Kursk)



GOROKHOV Ivan Aleksandrovich

Student

Kursk State University

(Russia, Kursk)

**Abstract.** The article considers durability increase of reinforced concrete structures including use of non-metallic composite reinforcement. In this regard, the improvement and development of methods for designing concrete structures with non-metallic composite fittings are relevant. The main applications of non-metallic composite reinforcement in concrete structures are considered. It is shown that the main factor ensuring the reliability of the structure is the adhesion of the composite reinforcement bar with concrete. The use of composite reinforcement in concrete structures requires ensuring that such structures are flame-resistant. The fire resistance of a composite fittings is determined by the softening temperature of the composite bar matrix. The article defines the range of structures, in which the use of composite reinforcement bars is possible with compliance of regulations on fire resistance limit requirements. Analysis of experimental studies of bending structures with composite bar fittings is carried out. To ensure the strength of bending elements in inclined sections, it is proposed to trim the bars of the working longitudinal work fittings, and geometric deflection parameters for certain types of composite reinforcement bars depending on the diameter of the rod.

**Keywords:** composite reinforcement bar; test methods; resistance; adhesion; flame resistance; bolt-tightening; prestressing

**For citation:** Merkulov S.I., Zhilyayev A.A., Gorokhov I.A. Research analysis of concrete structures with composite reinforcement bar // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 47-52. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_47.

**Ведение.** Основной задачей, решаемой на всех этапах жизненного цикла зданий и сооружений, является обеспечение надежности в заданных условиях и режимах эксплуатации, которая поддерживается долговечностью и безотказностью, как отдельных строительных конструкций, так и конструктивной системы здания в целом. Повышение долговечности железобетонных конструкций решается применением неметаллической композитной арматуры. Применение неметаллической композитной арматуры эффективно как при изготовлении сборного и монолитного железобетона, а также при усилении эксплуатируемых железобетонных и каменных конструкций. Нормативными документами рекомендуется применение неметаллической композитной арматуры при эксплуатации железобетонных конструкций в агрессивных условиях. В настоящее время освоено производство определенной номенклатуры неметаллической композитной арматуры. Неметаллическая композитная арматура обладает абсолютной стойкостью к агрессивной среде (хлоридной, сульфатной), высокой прочностью, композитная арматура огнестойкая, неэлектропроводная и диамагнитная, обладает высокими реологическими свойствами, не теряет высокие прочностные свойства при низких температурах. В тоже время объемы применения композитной арматуры в производстве железобетонных конструкций не велики. Причинами этого можно назвать малые объемы выпуска композитной арматуры, отсутствие нормативной базы по проектированию и изготовлению бетонных конструкций с композитной арматурой.

**Методы и материалы.** В документах по проектированию бетонных конструкций с композитной арматурой СП 295.1325800.2017 [1-2] имеются указания по назначению ее нормативных и расчетных характеристик. В тоже время предприятия производители композитной арматуры устанавливаются более высо-

кие значения характеристик выпускаемой ими арматуры. Так, разными производителями прочность на растяжение АСК устанавливается в пределах 800-1250 МПа, прочность АБК - в пределах 800-1450 МПа. В соответствии с ГОСТ 31938 предел прочности АСК и АБК должен составлять не менее 800 Мпа (таблица 1). Результаты испытаний стержневой арматуры [3-4] показывают необходимость обоснованного подхода к нормированию прочностных и деформативных характеристик.

**Таблица 1 - Характеристика стержневой композитной полимерной арматуры**

Арматура	Предел прочности при растяжении, МПа	Модуль упругости при растяжении, МПа	Источник
АСК	800	50000	СП 295.1325800.2017
АБК	800	50000	СП 295.1325800.2017
АУК	1400	130000	СП 295.1325800.2017
ААК	1400	70000	СП 295.1325800.2017
АСК	800	50000	СТО НОСТРОЙ 2.6.90-2013
АБК	900	50000	СТО НОСТРОЙ 2.6.90-2013
АСК	1250	60000	ТУ 2296-290-36554501-2010
АБК	1450	90000	ТУ 2296-290-36554501-2010
АСК	1200	55000	ТУ 5769-248-35354501-2007
АБК	1300	71000	ТУ 5769-248-35354501-2007
АСК	1250	60000	ТУ 2296-275-36554501-2008
АБК	1450	90000	ТУ 2296-275-36554501-2008
АСК	1200	55000	ТУ 5769-248-36554501-2007
АБК	1300	71000	ТУ 5769-248-36554501-2007
АСК	1250	74000	ТУ 2296-001-1087746110319-2013

Примечание: АСК-арматура стеклокомпозитная, АБК-арматура базальтокомпозитная; АУК-арматура углекомпозитная; ААК-арматура арамидокомпозитная.



При проектировании бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой в соответствии с [2], когда принимают минимальные значения характеристик арматуры, запроектированные конструкции фактически являются переармированными, так как что фактические значения прочности стержневой композитной арматуры на растяжение значительно превышают принимаемые.

Как показано в [6] на величину прочности композитной арматуры влияет структура стержней, состоящая из продольных нитей и оболочки. При работе композитной арматуры в составе бетонной конструкции вначале подвергается растяжению до определенных пределов оболочка арматуры, в дальнейшем в работу вступают внутренние продольно расположенные нити, на предел прочности на растяжение стержневой композитной полимерной арматуры оказывает влияние диаметра стержней.

Анализ технической документации [7-9] показывает, что на прочность композитной арматуры на растяжение оказывает величина диаметра стержней (таблица 2).

Таблица 2 – Характеристики композитной арматуры

Вид арматуры	Показатель	Диаметр стержня, мм				
		4	6	8	10	12
АСК	$\sigma$ , МПа	1200	1200	1100	1050	950
	E, Ма	43000	43000	43000	45000	45000
АБК	$\sigma$ , МПа	1500	1300	1250	1080	1100
	E, МПа	50000	50000	52000	52000	53000

Нормирования значений предела прочности на растяжение и модуля упругости для композитной арматуры позволят повысить качество и надежность проектных решений конструкций с применением композитной стержневой арматуры.

Основным фактором, обеспечивающим работоспособность конструкции, является сцепление арматуры с бетоном. Для обеспечения сцепления при изготовлении композитной полимерной стержневой арматуры создают профиль боковой поверхности аналогичной для поверхности металлических стержней. Профиль боковой поверхности при изготовлении стержней композитной полимерной арматуры получают вдавливанием или наклеиванием на тело стержня по спирали ровинга [10].

ГОСТ 31938 – 2012 «Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» устанавливает требования к испытаниям по определению прочности сцепления стержневой композитной полимерной арматуры с бетоном осевым выдергиванием из куба или испытанием балки на изгиб. Метод основан на определении значений сдвиговых напряжений по границе сцепления арматурного стержня с бетоном [11].

В [12] приведены результаты экспериментальных исследований сцепления стержневой композитной арматуры с цементным бетоном методом выдергивания арматурных стержней диаметром 8 мм из бетонных цилиндров диаметром 110 мм и высотой 100 мм. Цилиндры изготавливались из бетонов классов В12,5; В22,5; В35; В40. Установлено, что сцепление стержней композитной арматуры обеспечивается в основном за счет адгезии цементного камня с боковой поверхностью стержня, механическое зацепление витков обмотки стержня с бетоном не велико; устройство профиля стержней наклейкой на его поверхность жгута, пропитанного полимером, нецелесообразно, наиболее эффективным способом создания профиля стержня является обжатия стержня жгутом в процессе изготовления.

Выполнены исследования влияния условий и длительность эксплуатаций конструкций на величину сил сцепления композитной стержневой арматуры с бетоном [13]. Установлено, что при эксплуатации конструкций в воздушной среде силы сцепления увеличиваются. При эксплуатации в водной среде силы сцепления со временем снижаются несмотря на увеличение прочности бетона.

В работах [12-14] показана низкая прочность сцепления жгутов навивки с основным телом стержня композитной арматуры, а именно эта характеристика композитной арматуры должна обеспечить надежное ее сцепление с бетоном. Прочность сцепления жгутов навивки с основным телом стержня в ряде случаев не позволяет выполнить испытание стержней композитной арматуры на растяжение выдергиванием из бетонного куба. Стандарты предписывают во избежание смятия композитного стержня в захватах испытательной машины использовать специальные муфты, которые состоят из стальной трубки, в которую вставляют испытываемый стержень и заливают составом холодного отверждения. В ряде случаев испытываемый стержень вырывается из муфты в результате среза навивки с тела стержня. Поэтому сцепление композитной арматуры с бетоном целесообразно выполнять испытанием балки на изгиб [11].

Для бетонных конструкций с композитной арматурой необходимо обеспечить требуемый предел огнестойкости. Огнестойкость композитной стержневой арматуры определяется моментом размягчения матрицы композитного стержня в результате нагрева в условиях пожара. В работе [15] приведены результаты экспериментальных исследований для определения показателей физико-механических свойств композитной арматуры. Испытания на растяжение арматуры проводились как при нормальных температурных условиях, так и при локальном тепловом воздействии, установлены параметры температурного влияния на свойства стеклокомпозитной ар-



матуры, предложены величины коэффициента снижения предела прочности композита ( $\gamma$ ) и коэффициента снижения начального модуля упругости композит ( $\beta$ ) (таблица 3).

**Таблица 3 – Коэффициенты  $\gamma$  и  $\beta$  для стеклокомпозитной арматуры [15]**

Коэффициент	Значения коэффициентов при нагреве арматуры до температуры, °С							
	20	200	300	400	500	600	700	800
$\gamma$	1,0	0,95	0,74	0,65	0,59	0,51	0,46	0,42
$\beta$	1,0	1,0	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92

Основным фактором, обеспечивающим огнестойкость бетонных конструкций со стержневой композитной арматурой, является величина защитного слоя бетона. Величина защитного слоя бетона должна обеспечить совместную работу композитных стержней с бетоном, а также огнестойкость конструкции. В [16] выполнен сравнительный анализ величин защитного слоя бетона в конструкциях со стальной арматурой и композитной арматурой. Для обеспечения огнестойкости плиты перекрытия при переходе с армирования стальной арматурой на композитную арматуру защитный слой бетона увеличивается в 2 раза.

Применение композитной арматуры с учетом обеспечения требуемого предела огнестойкости возможно в конструкциях наружных стен и междуэтажных перекрытий в зданиях II - III степени огнестойкости [16-17].

В настоящее время выполнены экспериментальные исследования бетонных конструкций, армированных стержневой композитной арматурой.

В [18] приведены результаты испытаний изгибаемых элементов, армированных стальной арматурой А400, стеклопластиковой и базальтопластиковой арматурой, при кратковременной и длительной нагрузке. Целью исследований являлось исследование напряженно-деформированного состояния, характера разрушения балок, армированных композитами. Работа балок с композитной арматурой под нагрузкой характеризуется высокой деформативностью и линейной зависимостью «момент-прогиб» после образования трещин и вплоть до разрушения. Отмечено, что заниженные значения сопротивления композитной арматуры приводит к ошибочному определению характера разрушения изгибаемого элемента и переармированию конструкций. Зафиксировано разрушение изгибаемых элементов от продергивания стержней композитной арматуры, что говорит о необходимости проверки достаточности анкерования стержней.

Результаты многофакторных экспериментальных исследований конструкций с композитной арматурой приведены в [19]. Помимо испытания сцепления композитной арматуры с бетоном по ГОСТ

31938-2012, выполнены испытания изгибаемых элементов. Изгибаемые элементы сечением 120x220 мм армировались стержнями композитной арматуры диаметром 2, 4, 5, 7 мм с обеспечением постоянной суммарной площади поперечного сечения. В выводах сделаны предложения по назначению величины защитного слоя бетона не менее 20 мм из условия обеспечения сцепления. Использование в растянутой зоне изгибаемых элементов композитных стержней меньших диаметров приводит к увеличению жесткости элементов.

Известны предложения бетонных конструкций с предварительным напряжением стержневой композитной арматуры. В [20] приведены результаты экспериментальных исследований с оценкой влияния различных параметров предварительного напряжения композитной арматуры на жесткость и трещиностойкость изгибаемых бетонных элементов. В изгибаемых балках сечением 120x240 мм стеклопластиковая арматура в растянутой зоне 2 диаметром 8 мм с предварительным напряжением до 0,45 от предела прочности на растяжение, поперечное армирование – вязаные хомуты из арматуры диаметром 6 мм А500. Экспериментальные исследования показали, что значимого влияния предварительного напряжения АСК на несущую способность опытных конструкций не выявлено, разрушение всех опытных конструкций происходило в зоне чистого изгиба с разрывом растянутой арматуры без проскальзывания арматуры в бетоне не выявлено, образование трещин для конструкций с предварительным напряжением арматуры происходило при больших значениях нагрузки, чем для контрольных образцов без предварительного напряжения.

Применение композитной арматуры позволяет обеспечить коррозионную безопасность бетонных конструкций в агрессивных условиях эксплуатации. В настоящее время применение композитной арматуры в бетонных конструкциях применяется в сочетании со стальной поперечной арматурой. Замена стальной арматуры на композитную сталкивается с технологическими проблемами. Предлагается в бетонных изгибаемых балках использовать отгибы стержней композитной арматуры на опорных участках [21-23]. Для реализации этой задачи необходимо разработка технологии изготовления опытных образцов балок с отгибами стержней композитной арматуры на опорных участках, изучить особенности совместной работы отгибов стержней композитной арматуры и бетона в наклонных сечениях. В [21-23] разработаны рекомендации по отгибу стержней композитной арматуры, предложено расположение отгибов стержней композитной арматуры необходимо выполнить максимально близко к траектории главных растягивающих напряжений, максимальную величину загиба стержня назначать до 20 диаметров.



**Заключение.** Анализ выполненных исследований показал возможность применения композитной стержневой арматуры в бетонных конструкциях, особенно в условиях эксплуатации железобетонных конструкций в агрессивных средах.

При проектировании бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой в соответствии с СП 295.1325800.2017 принимают минимальные значения характеристик арматуры, при этом запроектированные конструкции фактически являются перearмированными. Необходимо проведение дополнительных исследований по определению расчетных характеристик различных видов композитной арматуры.

При применении композитной арматуры необходимо обеспечить стержней с бетоном. Для этого при изготовлении композитной полимерной стержневой арматуры создают профиль боковой поверхности аналогичной для поверхности металлических стержней. Подобные решения не всегда обеспечивают надежное сцепление, зачастую не обеспечивается сцепление композитного стержня в специальных муфтах для испытания стержня на разрыв, которые заливают составом холодного отверждения. Особенно важно решить задачу сцепления стержней с бетоном при предварительном натяжении арматуры.

Для бетонных конструкций с композитной арматурой необходимо обеспечить требуемый предел огнестойкости. Выполненными исследованиями установлена номенклатура конструкций, применение в которых композитной арматуры обеспечивает требуемый предел огнестойкости.

Исследования продемонстрировали возможность применения предварительного напряжения стержневой композитной арматуры, также разработаны рекомендации по отгибу продольных стержней композитной арматуры для обеспечения прочности опорных участков изгибаемых элементов.

#### Библиографический список

1. Римшин В.И., Меркулов С.И. Элементы теории развития бетонных конструкций с неметаллической композитной арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2015. №5. С. 38-42.
2. СП 295.1325800.2017 Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. М. 2017. 48 с.
3. Меркулов С.И., Акимов Э.К. Расчетные параметры композитной стержневой арматуры // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. Материалы Международных академических чтений. Курск. 2020. С. 26-29.
4. Римшин В.И., Меркулов С.И. О нормировании характеристик стержневой неметаллической композитной арматуры // Промышленное и гражданское строительство. 2016. № 5. С. 22-26.

5. Меркулов С.И., Акимов Э.К. Экспериментальные характеристики базальтопластиковой арматуры диаметра 6 мм // Наука и инновации в строительстве. (к 45-летию кафедры строительства и городского хозяйства) : сборник докладов международной научно-практической конференции : в 2 т. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. 2017. С. 73-76.

6. Кустикова Ю.О., Римшин В.И. Напряженно-деформированное состояние базальтопластиковой арматуры в железобетонных конструкциях // Промышленное и гражданское строительство. 2014. №6. С. 6 – 9.

7. ТР 013-1-04. Технические рекомендации по применению неметаллической композитной арматуры периодического профиля в бетонных конструкциях. НИИЖБ. 2004. 3 с.

8. Технические рекомендации по применению неметаллической композитной арматуры периодического профиля в бетонных конструкциях. НИИЖБ им. А.А.Гвоздева. – М., 2012. – 7 с.

9. СТО-02495307-007-2012. Применение неметаллической композитной арматуры АСП и АБП в бетонных конструкциях. ООО НПФ «УралСпецАрматура».- М., 2012. 20с.

10. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой // Известия КГАСУ. 2014. №3 (29). С.7-13.

11. ГОСТ 32492-2013 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Методы определения физико-механических характеристик. - М.: Стандартинформ. 2014. 19с.

12. Хозин В.Г., Пискунов А.А., Гиздатуллин А.Р., Куклин А.Н. Сцепление полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном // Известия КГАСУ. 2013. №1. С. 214-216.

13. Богданова Е.Р. Изменение свойств сцепления композитной полимерной арматуры с бетоном в условиях воздействия различных сред // Промышленное и гражданское строительство. 2016. №2. С. 39-43.

14. Бенин А.В., Семенов С.Г. Экспериментальные исследования сцепления композитной арматуры с плоской навивкой с бетоном // Промышленное и гражданское строительство. 2013. № 9. С. 74-76.

15. Ширко А.В., Камлюк А.Н., Спиглазов А.В., Дробыш А.С. Определение механических свойств композитной арматуры с учетом температурного воздействия // Механика машин, механизмов и материалов. 2015. № 2 (31). С. 59-65

16. Меркулов С.И., Римшин В.И., Акимов Э.К. Огнестойкость бетонных конструкций с композитной стержневой арматурой // Промышленное и гражданское строительство. 2019. № 4. С. 50-55.

17. Меркулова Е.В., Акимов Э.К. Обеспечение огнестойкости бетонных конструкций с композитной арматурой // Бюллетень строительной техники. 2018. № 8. С. 22-26.

18. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой // Известия КГАСУ. 2014. №3 (29). С.7-13.

19. Хозин В.Г., Гиздатуллин А.Р. Совместимость полимеркомпозитной арматуры с цементным бетоном в конструкциях // Строительные материалы. 2017. №11. С. 30-38.



20. Кудряков К.Л., Бучкин А.В., Юрин Е.Ю., Хлебников С.К., Пентюхова В.А. Влияние параметров предварительного напряжения арматуры композитной полимерной на жесткость и трещиностойкость изгибаемых бетонных элементов. Подготовка и проведение экспериментальных исследований // Вестник НИЦ «Строительство». 2023. №39(4). С.68–81.

21. Меркулов С.И., Акимов Э.К. Прочность наклонных сечений балок с композитной стержневой арматурой // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и

решения. Материалы Международных академических чтений. 2020. С. 180-185.

22. Меркулов С.И., Акимов Э.К. Методика экспериментальных исследований бетонных балок с композитной арматурой с отгибами на приопорных участках // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2020. № 9. С. 8-14.

23. Гиль А.И., Лазовский Е.Д. Перспективы применения пологоотогнутой стеклопластиковой арматуры в зоне среза изгибаемых армобетонных элементов // Вестн. Полоц. гос. ун-та. Сер. Ф, Строительство. Прикладные науки. 2016. № 8. С. 61–66.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 15.01.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 15.01.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья  
УДК 666.972.1  
ГРНТИ: 67.09 Строительные материалы и изделия  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_53

### АНАЛИЗ КОМПЛЕКСНОГО ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫХ ДОБАВОК И ГЛИНИТА НА ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ МЕЛКОЗЕРНИСТЫХ БЕТОНОВ

© Авторы, 2026  
SPIN: 7494-0840

**НИЗИНА Татьяна Анатольевна**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»  
(Россия, Саранск, e-mail: nizinata@yandex.ru)

SPIN: 6597-4420

**ВОЛОДИН Владимир Владимирович**  
кандидат технических наук  
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»  
(Россия, Саранск, e-mail: volodinvv1994@gmail.com)

SPIN: 9618-9761

**КОРОТИН Александр Иванович**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»  
(Россия, Саранск, e-mail: alkor260465@yandex.ru)

SPIN: 3282-4758

**МИТРОШИН Игорь Александрович**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»  
(Россия, Саранск, e-mail: rniic@yandex.ru)

SPIN: 2373-4863

**МАТЯКУБОВ Хасан Бахрамович**  
аспирант  
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»  
(Россия, Саранск, e-mail: abakan\_94h@mail.ru)

**Аннотация.** Приведены результаты влияния комплексных органоминеральных добавок (ОМД) на изменение свойств мелкозернистых бетонов. Органоминеральные добавки создавались на основе обожженной при 700°C глины Никитского месторождения, эфира поликарбоксилатов Синтефлу МЕГА 52 и смеси композиции на основе изопропаноламинов ESP800. Соотношение компонентов ОМД оптимизировалось методом экспериментально-статистического моделирования, варьируя длительность помола (2-4 часа), содержание эфира поликарбоксилатов (0,15÷0,35% от массы минеральной добавки) и смеси композиции ESP800 (0,1÷0,25% от массы минеральной добавки). Водоцементное отношение подбиралось для обеспечения одинаковой подвижности бетонной смеси (расплыв 130 мм). Выявлены оптимальные концентрации эфира поликарбоксилата Синтефлу МЕГА 52 и добавки ESP800, составляющие, соответственно, 0,25% и 0,175% от массы глиниста. Разработанные составы ОМД позволяют обеспечивать комплекс упруго-прочностных показателей (предел прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, модуль упругости при сжатии) на уровне бездобавочных бетонов при снижении расхода цемента на 20% по массе.

**Ключевые слова:** мелкозернистый бетон; органоминеральная добавка; обожженная глина; эфир поликарбоксилатов; смеси композиции на основе изопропаноламинов

**Для цитирования:** Анализ комплексного влияния поверхностно-активных добавок и глиниста на изменение свойств мелкозернистых бетонов / Т.А. Низина, В.В. Володин, А.И. Коротин, И.А. Митрошин, Х.Б. Матякубов // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 53-59. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_53.



Original article

ANALYSIS OF COMPLEX EFFECTS FROM SURFACTANT ADDITIVES AND GLUYENITE  
ON FINE-GRAINED CONCRETE PROPERTIES

© The Author(s) 2026

**NIZINA Tatyana Anatolievna**

Doctor of Technical Sciences, professor  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«National Research Ogarev Mordovia State University»  
(Russia, Saransk, e-mail: nizinata@yandex.ru)*

**VOLODIN Vladimir Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«National Research Ogarev Mordovia State University»  
(Russia, Saransk, e-mail: volodinvv1994@gmail.com)*

**KOROTIN Aleksandr Ivanovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate professor  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «National  
Research Ogarev Mordovia State University»  
(Russia, Saransk, e-mail: alkor260465@yandex.ru)*

**MITROSHIN Igor Aleksadrovich**

Candidate of technical Sciences, Associate professor  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«National Research Ogarev Mordovia State University»  
(Russia, Saransk, e-mail: rniic@yandex.ru)*

**MATYAKUBOV Hasan Bahramovich**

PhD Candidate  
*Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education  
«National Research Ogarev Mordovia State University»  
(Russia, Saransk, e-mail: abakan\_94h@mail.ru)*

**Abstract.** Presented here are the outcomes illustrating how complex organomineral additives (OMAs) affect the properties of fine-grained concretes. Organomineral additives were developed based on clay from Nikitsky deposit fired at 700°C, polycarboxylate ether Synteflow MEGA 52, and an isopropanolamine blend ESP800. The component ratio of the organomineral additives (OMAs) was optimized using experimental-statistical modeling by varying grinding duration (2-4 hours), content of polyacrylate ether (0.15–0.35% by mass of mineral additive), and ESP800 blend content (0.1–0.25% by mass of mineral additive). The water-cement ratio was adjusted to ensure equal consistency of the concrete mixture (slump spread of 130 mm). Optimal concentrations of polycarboxylate ether Synteflow MEGA 52 and ESP800 additive were determined, corresponding to 0.25% and 0.175%, respectively, of the glinite mass. Developed OMAs formulations make it possible to attain a complete range of elastic-strength properties (including compressive strength limits, tensile strength in bending, and modulus of elasticity in compression) that match those of conventional concrete, all while decreasing cement usage by up to 20 percent by mass.

**Keywords:** fine-grained concrete; organomineral additive; calcined clay; polycarboxylate ether; blends based on isopropanolamines

**For citation:** Analysis of complex effects from surfactant additives and gluyenite on fine-grained concrete properties / T.A. Nizina, V.V. Volodin, A.I. Korotin, I.A. Mitroshin, H.B. Matyakubov // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 53-59. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_53.

Современное строительство предъявляет высокие требования к качеству, долговечности и экономической эффективности используемых строительных материалов. В этих условиях растёт интерес к разработке инновационных видов бетонов, облада-

ющих улучшенными эксплуатационными характеристиками, такими как повышенная прочность, долговечность и устойчивость к агрессивным средам [1-2]. Традиционные методы улучшения свойств бетонов, такие как применение химических добавок и мине-



ральных наполнителей, уже показали свою эффективность. В последние годы особое внимание уделяется комбинированию различных видов добавок, что позволяет существенно расширить функциональные возможности материалов [3-4].

Одним из перспективных направлений повышения качества бетонов является использование органоминеральных добавок (ОМД), которые представляют собой композиции на основе минеральных наполнителей и органических соединений. Органо-минеральные добавки обладают уникальными свойствами, сочетая в себе преимущества как органических, так и минеральных компонентов, что позволяет улучшать физико-механические характеристики бетона [5]. Минеральная составляющая таких добавок позволяет целенаправленно модифицировать структуру бетона, увеличивая его плотность. Это структурное уплотнение является ключевым фактором, снижающим водопоглощение и повышающим стойкость материала к многократным циклам замораживания и оттаивания [6-7]. Органо-минеральные добавки создают синергетический эффект, который обеспечивает более высокие эксплуатационные свойства бетонов по сравнению с традиционными материалами.

Номенклатура минеральных модификаторов включает весьма широкий перечень материалов природного, искусственного и техногенного происхождения [8]. Однако объёмы их производства не удовлетворяют имеющийся спрос в строительных материалах на основе цементных бетонов, всвязи с чем в последние годы идут активные исследования по получению минеральных добавок обжигом широко распространённых глинистых пород как зарубежными [9-12], так и отечественными учёными [13-17]. Данные добавки позволяют снижать расход портландцемента в составе бетонных смесей без уменьшения прочностных показателей бетона. Ввиду загущающей способности минеральных добавок, применение их в цементных бетонах без потери реологических показателей возможно только в комплексе с высокоэффективными супер- и гиперпластификаторами. Наибольшую эффективность показали добавки на основе эфиров поликарбоксилатов, однако высокая стоимость, связанная в основном с импортным производством, снижала экономическую эффективность совместного применения поликарбоксилатных пластификаторов и минеральных добавок на основе термоактивированных глин.

В 2012 году ГК «Синтез ОКА» запустила на территории Российской Федерации производство эфиров поликарбоксилатов. В 2019 году на производственных площадях ГК «Синтез ОКА» началось производство новых продуктов для строительной химии – триизопропаноламина (ТИПА) и диэтанализопропаноламина (ДЭИПА), позволяющих создавать но-

вые эффективные рецептуры интенсификаторов помола.

Реализуемая в данной статье задача связана с оценкой влияния ОМД, получаемых на основе комплексов изопропаноламина, эфира поликарбоксилата и глиниста, на изменение упруго-прочностных показателей мелкозернистых бетонов. Исследования проводились на мелкозернистом бетоне, состоящем из модифицированного вяжущего и песка в соотношении 1:3 по массе. Водовязущее отношение исследуемых составов подбиралось до обеспечения равноподвижных смесей, обладающих расплывом из конуса ~ 130 мм. Модифицированное цементное вяжущее состояло из 80% портландцемента (ЦЕМ I 42,5 Н производства АО «ВолгаЦемент») и 20% органо-минеральной добавки.

Исследуемые ОМД изготавливались совместным помолом следующих компонентов:

- полиминеральная глина Никитского месторождения Республики Мордовия, измельченная до фракции не более 2,5 мм и обожжённая при температуре 700 °С в течении 2 часов (далее по тексту МД);
- эфир поликарбоксилата Синтефлюу МЕГА 52 производства ООО «Синтез Ока – строительная химия» (далее по тексту СП);
- смесевая композиция на основе изопропаноламина ESP800 производства ООО «Синтез Ока – строительная химия» (далее по тексту ESP800).

**Таблица 1 – Исследуемые факторы и уровни их варьирования**

Уровни варьирования в кодированных величинах	Варьируемые факторы		
	Длительность помола ( $x_1$ ), час.	Доля СП ( $x_2$ ), % от массы МД	Доля добавки ESP800 ( $x_3$ ), % от массы МД
-1	2	0,15	0,1
0	3	0,25	0,175
+1	4	0,35	0,25

**Таблица 2 – План экспериментального исследования**

Факторы	Значения факторов в кодированных величинах в зависимости от номера состава																		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
	Составы основного блока															Контрольные составы			
$x_1$	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	1	0	0	0	0	0	Без ОМД	-1	0	1	
$x_2$	1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	0	-1	1	0	0	0		-			
$x_3$	1	-1	1	-1	1	-1	-1	0	0	0	-1	1	0						

Оптимизация технологических режимов получения органо-минеральной добавки осуществлялась с применением экспериментально-статистического моделирования для следующих комбинаций факторов (см. табл. 1):  $x_1$  – длительность помола ОМД (2-



4 часа);  $x_2$  – содержание СП(0,15±0,35% от массы МД);  $x_3$  – содержание ESP800 (0,1±0,25% от массы МД). План экспериментального исследования представлен 19 экспериментальными точками (см.

табл. 2). Оценка влияния ОМД на упруго-прочностные свойства мелкозернистого бетона проводилась в возрасте 28 суток. Результаты испытаний представлены на рисунках 1–3.

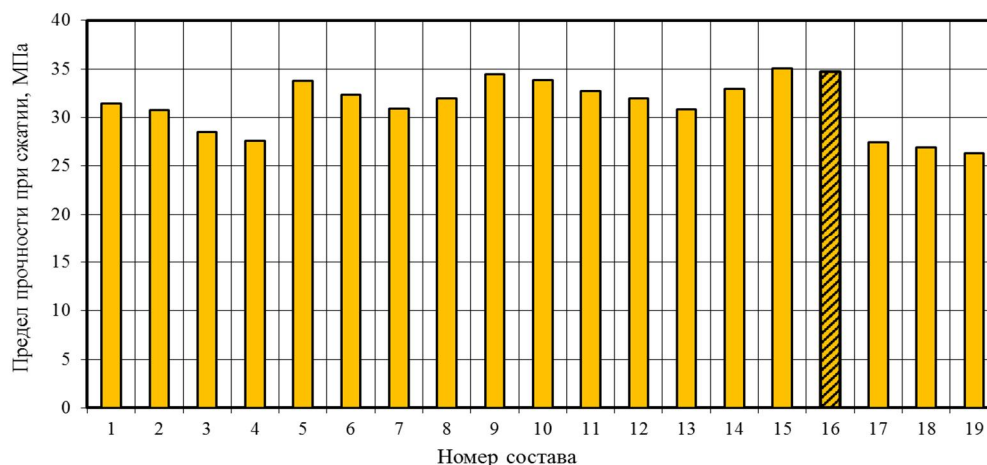


Рисунок 1 – Предел прочности при сжатии модифицированных мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток

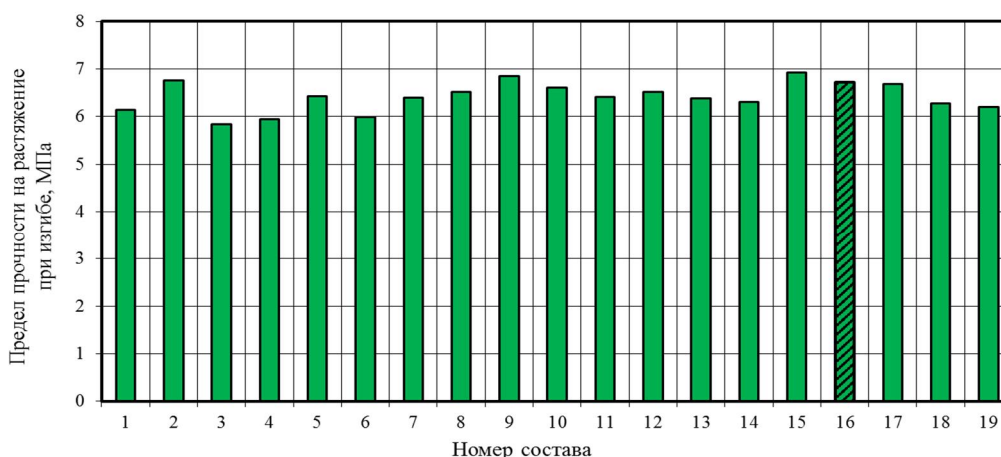


Рисунок 2 – Предел прочности на растяжение при изгибе модифицированных мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток

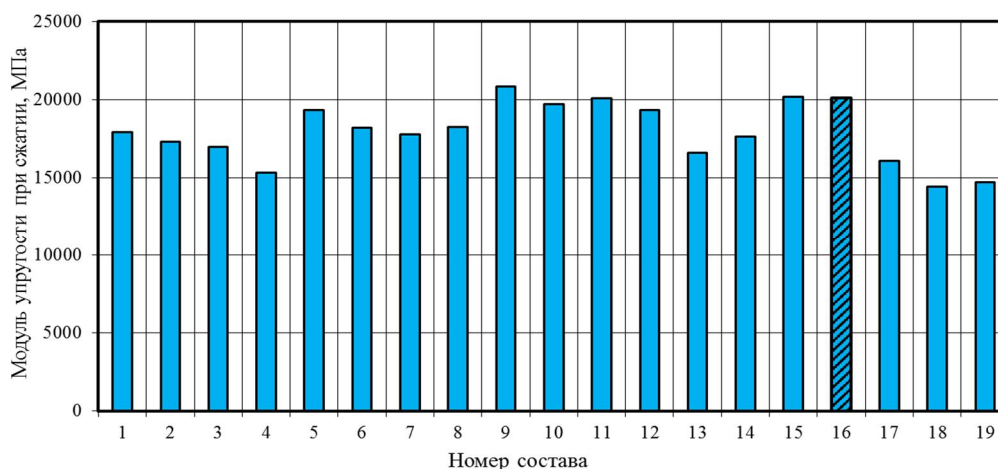


Рисунок 3 – Модуль упругости при сжатии модифицированных мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток



Анализ рисунков 1-3 показал, что введение в состав вяжущего 20% исследуемых ОМД позволяет регулировать упруго-прочностные характеристики в достаточно широком диапазоне: 27,6÷35,0, 5,8÷6,9 и 15320÷20833 МПа соответственно для пределов прочности при сжатии и на растяжение при изгибе, а также модуля упругости при сжатии в возрасте 28 суток. Наиболее высоким комплексом свойств обладают бетоны 9 и 15 составов, содержащих ОМД, получаемые при концентрации СП 0,25% и ESP800 0,175% при длительности помола, соответственно, 2 и 3 часа.

Время помола ОМД оказывает значительное влияние на её экономическую эффективность применения в составе вяжущего, наряду с температурой обжига её минеральной части. Результаты, представленные на рисунке 4, показывают, что увеличение длительности помола ОМД более 3 часов, не приводят к повышению предела прочности при сжатии как основного показателя качества бетона. Данный эффект можно объяснить способностью применяемых поверхностно-активных веществ (СП и ESP800) выступать в качестве интенсификаторов помола [18-20].

Для описания влияния состава и длительности помола ОМД на исследуемые упруго-прочностные характеристики модифицированных мелкозернистых бетонов были рассчитаны коэффициенты полиномиального уравнения:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_3 \cdot x_3 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2 + b_{13} \cdot x_1 \cdot x_3 + b_{23} \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{123} \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{33} \cdot x_3^2 + b_{112} \cdot x_1^2 \cdot x_2 + b_{122} \cdot x_1 \cdot x_2^2 + b_{113} \cdot x_1^2 \cdot x_3 + b_{112233} \cdot (x_1 \cdot x_2 \cdot x_3)^2, \quad (1)$$

где  $b_0, b_i, b_{ij}, b_{ijz}, b_{iiijzz}$  – коэффициенты полинома ( $i, j, z = 1, 2, 3$ );  $x_1, x_2, x_3$  – варьируемые факторы в кодированных величинах (таблица 1).

Полиномиальные уравнения для пределов прочности при сжатии, на растяжение при изгибе и модуля упругости при сжатии в возрасте 28 суток представлены следующими зависимостями:

$$R_{сж.28} = 35,01 - 0,27 \cdot x_1 - 0,37 \cdot x_2 + 1,04 \cdot x_3 + 0,36 \cdot x_1 \cdot x_2 + 0,16 \cdot x_1 \cdot x_3 + 0,28 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,35 \cdot x_1 \cdot x_2 \cdot x_3 - 0,87 \cdot x_1^2 - 2,70 \cdot x_2^2 - 3,12 \cdot x_3^2 + 1,53 \cdot x_1^2 \cdot x_2 - 1,06 \cdot x_2^2 \cdot x_3 \quad (2)$$

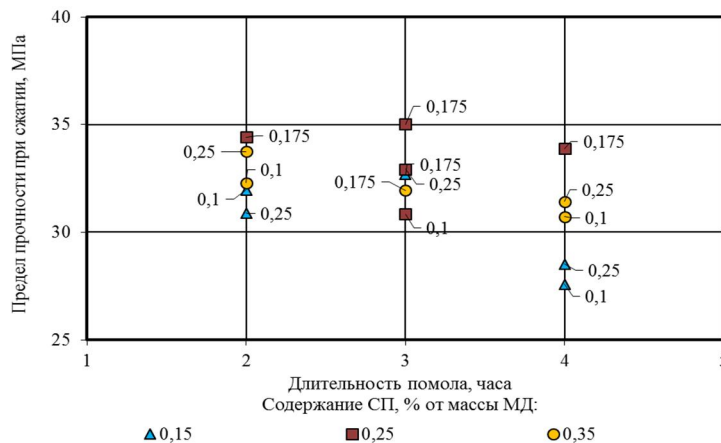


Рисунок 4 – Влияние длительности помола ОМД на предел прочности при сжатии модифицированных мелкозернистых бетонов в возрасте 28 суток

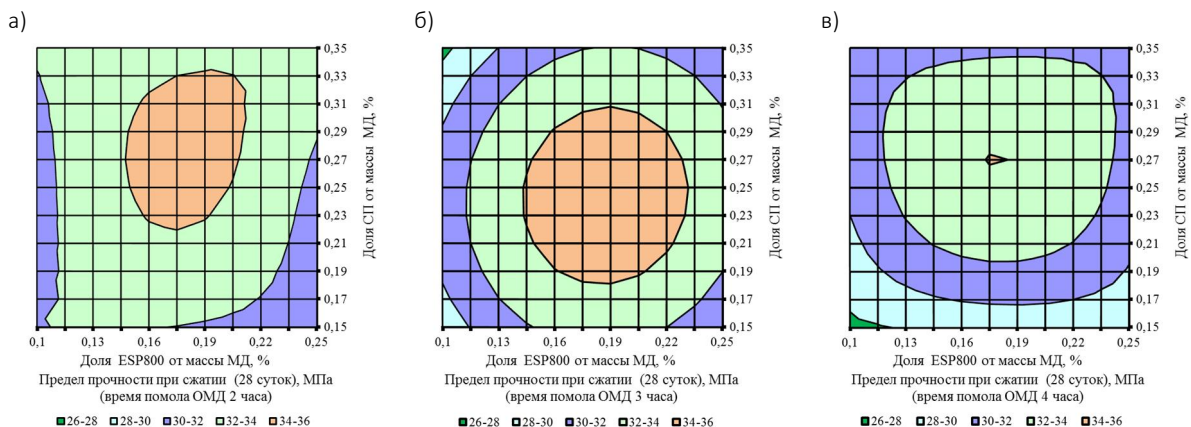


Рисунок 5 – Изолинии изменения предела прочности при сжатии (28 суток) модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от содержания химических добавок в составе ОМД при длительности помола (ч.): а – 2; б – 3; в – 4



x1 · x2^2 - 0,79 · x1^2 · x3 + 2,57 · (x1 · x2 · x3)^2;

R\_изг.28 = 6,93 - 0,12 · x1 + 0,05 · x2 - 0,04 · x3 + 0,20 · x1 · x2 - 0,13 · x1 · x3 + 0,01 · x2 · x3 - 0,13 · x1 · x2 · x3 - 0,20 · x1^2 - 0,46 · x2^2 - 0,59 · x3^2 + 0,02 · x1^2 · x2 + 0,04 · x1 · x2^2 - 0,01 · x1^2 · x3 + 0,57 · (x1 · x2 · x3)^2;

E\_сж.28 = 20185,52 - 555,28 · x1 - 389,64 · x2 + 539,52 · x3 + 179,19 · x1 · x2 + 199,97 · x1 · x3 + 64,79 · x2 · x3 - 319,86 · x1 · x2 · x3 + 92,36 · x1^2 - 474,29 · x2^2 - 3073,83 · x3^2 + 950,07 · x1^2 · x2 - 196,34 · x1 · x2^2 - 175,23 · x1^2 · x3 + 901,54 · (x1 · x2 · x3)^2.

Построенные по полиномиальным зависимостям (2) – (4) изолинии изменения вышеуказанных упруго-прочностных показателей показаны на рисунках 5-7.

Установлено, что на каждом исследуемом уровне помола достижение максимальных уровней упруго-прочностных показателей достигается достаточно широким диапазоном варьирования СП и

ESP800 в составе ОМД. Так, наиболее оптимальная концентрация СП от массы МД при длительности помола 2, 3 и 4 часа составляет, соответственно: для предела прочности при сжатии – 0,22±0,33, 0,18±0,31 и 0,27% (рис. 5); для предела прочности на растяжение при изгибе – 0,19±0,28, 0,19±0,32 и 0,22±0,35% (рис. 6); для модуля упругости при сжатии – 0,15±0,35, 0,15±0,28 и 0,19±0,35% (рис. 7). Оптимальная концентрация ESP800 от массы МД также достаточно широко варьируется при различной длительности помола (2, 3 и 4 часа) и составляет, соответственно: для предела прочности при сжатии – 0,15±0,21, 0,14±0,23 и 0,17±0,18% (рис. 5); для предела прочности на растяжение при изгибе – 0,15±0,21, 0,13±0,21 и 0,10±0,21% (рис. 6); для модуля упругости при сжатии – 0,14±0,23, 0,16±0,21 и 0,14±0,23% (рис. 7).

По результатам проведенных исследований установлено, что концентрация поверхностно-активных веществ в составе ОМД играет ключевую роль для достижения наилучших показателей мелкозернистого бетона. Установлено, что наиболее опти-

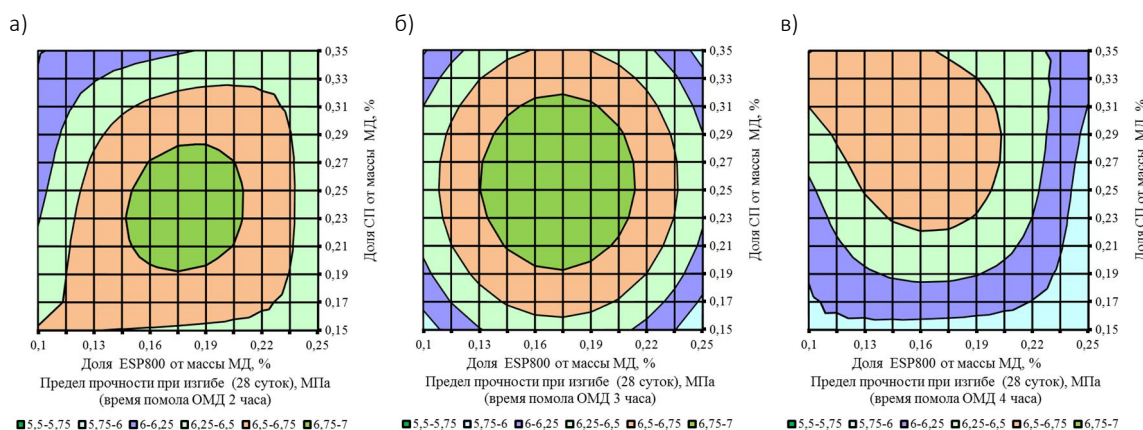


Рисунок 6 – Изолинии изменения предела прочности на растяжение при изгибе (28 суток) модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от содержания химических добавок в составе ОМД при длительности помола (ч.): а – 2; б – 3; в – 4

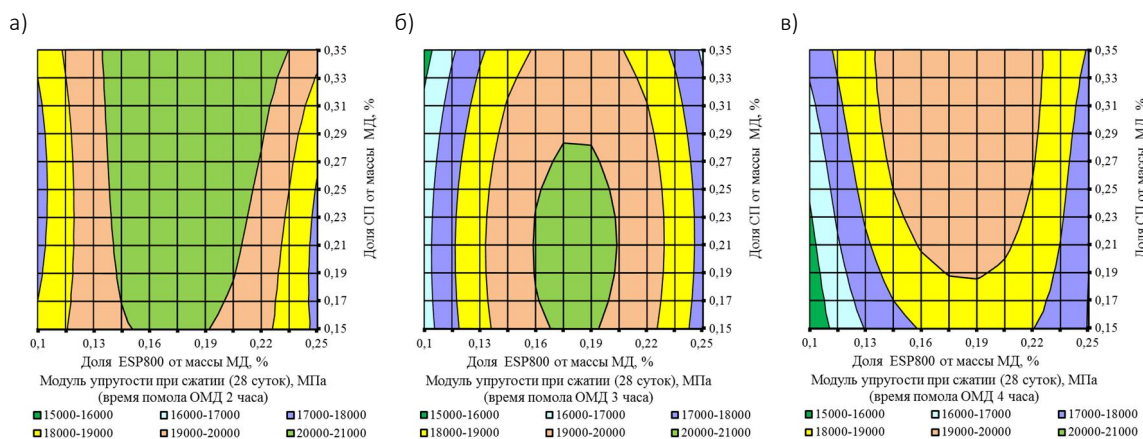


Рисунок 7 – Изолинии изменения модуля упругости при сжатии (28 суток) модифицированных мелкозернистых бетонов в зависимости от содержания химических добавок в составе ОМД при длительности помола (ч.): а – 2; б – 3; в – 4



мальная концентрация эфира поликарбоксилата Синтефлуу МЕГА 52 от массы МД составляет 0,25%, добавки ESP800 – 0,175%. Оптимальная длительность помола находится в интервале от 2 до 3 часов. Разработанные составы ОМД позволяют обеспечивать комплекс упруго-прочностных показателей на уровне бездобавочных бетонов при снижении расхода цемента на 20% по массе.

#### Библиографический список

1. Калашников, В.И. Эволюция развития составов и изменение прочности бетонов. Бетоны настоящего и будущего. Часть 1. Изменение составов и прочности бетонов / В.И. Калашников // Строительные материалы. – 2016. – №1-2. – С. 96-103.
2. Ушеров-Маршак, А.В. Бетоны нового поколения – бетоны с добавками / А.В. Ушеров-Маршак // Бетон и железобетон. Оборудование. Материалы. Технологии. – 2011. – № 1. – С. 78-81.
3. Низина, Т.А. Влияние комплексных модификаторов на основе поликарбоксилатного суперпластификатора и минеральных добавок различного состава на технологические и физико-механические свойства цементных систем / Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин, С.В. Володин, В.В. Володин // Региональная архитектура и строительство. – 2022. – № 1(50). – С. 28-36.
4. Калашников, В.И. О применении комплексных добавок в бетонах нового поколения / В.И. Калашников, О.В. Тараканов // Строительные материалы. – 2017. – № 1-2. – С. 62-67.
5. Тараканов, О.В. Эффективность применения комплексных органоминеральных добавок в технологии бетонов / О.В. Тараканов, В.И. Калашников, В.М. Журавлёв // Композиционные строительные материалы. Теория и практика. – 2016. – С. 88-94
6. Исследование влияния активных минеральных добавок на процессы формирования состава и структуры продуктов гидратации цемента / В. А. Манкевич, А. Т. Волочко, А. А. Мечай, Е. И. Барановская // Современные методы и технологии создания и обработки материалов : Сборник научных трудов. – Минск : Государственное научное учреждение "Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси", 2023. – С. 198-205. – EDN QFMBIQ.
7. Низина, Т.А. Анализ комплексного влияния модифицирующих добавок и дисперсного армирования на физико-механические характеристики мелкозернистых бетонов / Т.А. Низина, А.С. Балыков // Региональная архитектура и строительство. – 2015. – №4. – С. 25-33.
8. Низина, Т.А. Оценка физико-химической эффективности минеральных добавок различного состава в цементных системах / Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин, В.В. Володин, С.В. Володин // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 5(14). – С. 41-47.
9. Schulze, S.E. Optimization of cements with calcined clays as supplementary cementations materials / S.E. Schulze, R. Pierkes, J. Rickert // Proc. XIV International Congress on the Chemistry of cement. Beijing, China. – 2015. – 693 p.
10. Castello, L.R. Evolution of calcined clays soils as supplementary cementitious materials / L.R. Castello, H.J.F. Hernandez, K.L. Scrivener, M. Antonic // Proceedings of a XII International Congress of the chemistry of cement. Instituto de Ciencias de la Construction «Eduardo torroja». – Madrid. – 2011. – P. 117.
11. Шульце, С.Е. Свойства цементов с прокалёнными глинами в качестве основного компонента / С.Е. Шульце, Й. Рикерт // Цемент и его применение. – 2016. – №1. – С. 152-156.
12. Скибстед, Й. Термическая активация и пуццолановая активность кальцинированных глин для использования в портландцементных с добавками / Й. Скибстед, К.Е. Расмуссен, Н. Гарг // Цемент и его применение. – 2016. – №1. – С. 144-151.
13. Rakhimov, R.Z. Properties of Portland cement paste incorporated with loamy clay / R.Z. Rakhimov, N.R. Rakhimova, A.R. Gaifullin, V.P. Morozov // Geosystem Engineering. – 2017. – Т. 20. – №6. – С. 318-325.
14. Гайфулин, А.Р. Влияние добавок глинистых в портландцемент на прочность при сжатии цементного камня / А.Р. Гайфулин, Р.З. Рахимов, Н.Р. Рахимова // Инженерно-строительный журнал. – 2015. – № 7 (59). – С. 66-73.
15. Fernandez, R. The origin of the pozzolanic activity of calcined clay minerals: A comparison between kaolinite, illite and montmorillonite / R. Fernandez, F. Martizena, K.L. Scrivener // Cement and Concrete Reserch. – 2011. – № 41. – P. 113-122.
16. Низина, Т.А. Влияние термоактивированных глин и карбонатных пород на фазовый состав и свойства модифицированного цементного камня / Т.А. Низина, А.С. Балыков, В.В. Володин, В.М. Кяшкин, А.А. Ерофеева // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2019. – № 8(728). – С. 45-55.
17. Володин, В.В. Опыт применения обожжённой глины в качестве минеральной добавки к цементным композитам / В.В. Володин, Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.И. Коровкин, И.С. Козлятников, Д.С. Башкаев, А.А. Григорьева // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: материалы Всеросс. науч.-техн. конф. – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2018. – С. 36-42.
18. Шахова, Л.Д. К вопросу о механизме действия интенсификаторов помола цемента / Л.Д. Шахова, Р.А. Котляров, Е.С. Черноситова // Цемент и его применение. – 2023. – № 1. – С. 104-111.
19. Ломеченко, Д.В. Влияние поверхностно-активных добавок на размолоспособность цементного клинкера // Д.В. Ломеченко, Н.П. Кудярова // Строительные материалы. – 2010. – № 8. – С. 58-59.
20. Schrabback, J.M. Polycarboxylatepolimer - powered drinding efficiency / J.M. Schrabback // Global Cement Magazine. – 2009. – July - Avgust. – Pp. 14-16.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 10.02.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 10.02.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.



Научная статья

УДК 69

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\_1\_60

### ВЛИЯНИЕ ИОНОВ ХЛОРА НА ХИМИЧЕСКОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ЦЕМЕНТНЫХ КОМПОЗИТОВ

© Авторы 2026

SPIN: 4845-3197

**СЕЛЯЕВ Владимир Павлович**

академик РААСН, доктор технических наук, профессор,

заведующий кафедрой «Строительные конструкции»

*Российская академия архитектуры и строительных наук;*

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет*

*им. Н.П. Огарёва*

*(Россия, Саранск, e-mail: ntorm80@mail.ru)*

SPIN: 7431- 8742

**КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна**

кандидат технических наук, доцент

*Национальный исследовательский Мордовский государственный университет*

*им. Н.П. Огарёва*

*(Россия, Саранск)*

**Аннотация.** В статье изучено влияние водных растворов хлорид-ионов на химическое сопротивление цементных композитов с учетом пластифицирующих добавок и минеральных наполнителей. Взаимодействие с растворами, содержащими ионы хлора, привели к изменению кислотности в цементном композите, которое контролировалось с помощью рН-метра «Эксперт РН». Проведен анализ фильтрата на содержание ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  комплексонометрическим методом. Содержание ионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  определялось спектрометрическим методом. Установлены вид и характер кинетических зависимостей рН-показателя от концентрации агрессивной среды и времени экспонирования.

**Ключевые слова:** химическое сопротивление; наполнитель; пластификатор; кислотность; микрокремнезем; цементный композит; цеолитсодержащие породы; хлорид-ионы; прочность; фильтрат; соляная кислота

**Для цитирования:** Селяев В.П., Куприяшкина Л.И. Влияние ионов хлора на химическое сопротивление цементных композитов // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 60-64. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_60.

Original article

### THE EFFECT OF CHLORINE IONS ON THE CHEMICAL RESISTANCE OF CEMENT COMPOSITES

© 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)*

**KUPRIYASHKINA Lyudmila Ivanovna**

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 examines the effect of aqueous solutions of chloride ions on the chemical resistance of cement composites considering plasticizing additives and mineral fillers. The interaction with solutions containing chlorine ions led to a change in the acidity in the cement composite, which was monitored using the "Expert PH" pH meter. The filtrate was analyzed for the content of  $\text{Ca}^{2+}$  and



Mg<sup>2+</sup> ions by the complexometric method. The content of Fe<sup>3+</sup> and Al<sup>3+</sup> ions was determined by the spectrometric method. The type and nature of the kinetic dependences of the pH indicator on the concentration of aggressive medium and exposure time have been established.

**Keywords:** chemical resistance; filler, plasticizer; acidity; microsilicon; cement composite; zeolite-containing rocks; chloride ions; strength; filtrate; hydrochloric acid

**For citation:** Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I. The effect of chlorine ions on the chemical resistance of cement composites // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 60-64. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_60.

Химическое сопротивление цементных композитов действию ионов хлора представляет научный и практический интерес. В состав цементных композитов ионы хлора могут попадать вместе с компонентами, формирующими структуру композита: наполнителями, минерализованной водой затворения, добавками – ускорителями твердения, а также из растворов соли, применяемой для удаления льда с поверхности бетона [1-4].

Ионы хлора, проникая в структуру цементного композита, вступают в химическое взаимодействие: с трехкальциевым алюминатом, образуя хлоралюминат кальция; с трехкальциевым силикатом, образуя гидроксид кремния, который является когматантом и замедляет процесс переноса агрессивной среды в объем изделия [5-6].

Химическое сопротивление цементных композитов действию водных растворов хлорид-ионов лимитируется проницаемостью, скоростью диффузии, с которой ионы хлора с поверхности композита проникают в структуру материала [7-10].

Установлено, что скорость переноса ионов хлоразависит от структуры композита: объема пор и их распределения по размерам, плотности, извилистости. Известно, что пористость композитов можно регулировать с помощью изменения водоцементного отношения, введения пластифицирующих добавок и минеральных наполнителей. Так, частичная замена цемента на микрокремнезем уменьшает пористость структуры, снижает уровень щелочности в композите и соответственно химическую активность и скорость коррозии в хлоридной среде [11].

Целью настоящего исследования являются: экспериментальное изучение процессов, происходящих в цементном композите при его взаимодействии с растворами, содержащими ионы хлора; определение основных параметров химического сопротивления композитов растворам хлористо-водородных соединений.

Для проведения экспериментальных исследований были изготовлены образцы-призмы размером 20×20×70 мм из цементных композитов на мальцовском и мордовском цементах, содержащих суперпластификаторы (Пластанол-7 и Хидетал), наполнители (микрокремнезем МКУ-85 и цеолитсодержащую породу – ЦСП). Составы композитов приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Составы цементных композитов

№ состава	Вид цемента	В/Ц	Наполнитель		Суперпластификатор	
			Вид	Кол-во от массы цемента, %	Вид	Кол-во от массы цемента, %
1	ПЦ-М500-ДО ОАО «Мальцовский цементный завод»	0,3	МКУ-85	15	Пластанол-7	0,9
2	ПЦ-М500-ДО ОАО «Мальцовский цементный завод»	0,27	МКУ-85	15	Хидетал-ГП-9-γ	0,5
3	ПЦ-М400 ДО ОАО «Мордовцемент»	0,32	МКУ-85	10	Пластанол-7	0,9
4	ПЦ-М400 ДО ОАО «Мордовцемент»	0,32	МКУ-85	15	Хидетал-ГП-9-γ	0,5
5	ПЦ-М400 ДО ОАО «Мордовцемент»	0,4	ЦСП	10	–	–
6	ПЦ-М400 ДО ОАО «Мордовцемент»	0,4	ЦСП	20	–	–
7	ПЦ-М400 ДО ОАО «Мордовцемент»	0,4	ЦСП	30	–	–

В качестве агрессивной среды были приняты 1%, 2% и 3% водные растворы соляной кислоты и 25% раствор NaCl. Образцы в агрессивных средах выдерживались при нормальной температуре. После 7, 14, 28, 180 сут экспонирования в растворах образцы вынимали из агрессивной среды, подсушивали на воздухе на фильтровальной бумаге и фиксировали следующие изменения: содержание ионов кальция в фильтрате, его кислотность, масса образцов, глубина проникания среды и зона разрушения структуры, предел прочности при сжатии, предельные деформации. По экспериментальным данным определялись: механизм химического и физического разрушения композита; показатели химического сопротивления цементного камня агрессивным средам; предельная сорбционная емкость ( $\omega_0$ ); коэффициент эффективной проводимости ( $D_m$ ); коэффициент химического сопротивления ( $k_{xc}$ ). Кислотность раство-



ров контролировалась с помощью рН-метра «Эксперт РН».

Фильтрат анализировали на содержание ионов  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  комплексонометрическим методом. Содержание ионов  $\text{Fe}^{3+}$  и  $\text{Al}^{3+}$  определяли спектрометрическим методом. Осадок, выделенный из цементного камня в процессе контакта с  $\text{HCl}$ , сушили, элементный состав исследовали энергодисперсным рентгеновским методом. Структура осадка изучалась с помощью многофункционального растрового электронного микроскопа «Quanta 200i 3DFEI».

Установлены вид и характер кинетических зависимостей  $\text{pH} - t$ . Из кинетических кривых, представленных на рисунке 1 видно, что  $\text{pH}$  растворов в 1% кислоте повышается быстрее, чем в 2, и 3%. Равновесие наступает в системе «цементный камень – кислота» через 7–10 суток в 1% кислоте ( $\text{pH}$  11), через 15 сут – в 2% кислоте ( $\text{pH}$  10), через 22 дня – в 3% кислоте ( $\text{pH}$  9).

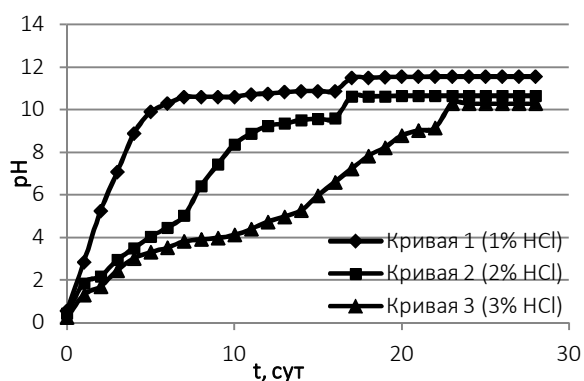
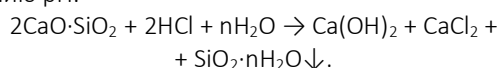


Рис. 1. Динамика изменения  $\text{pH}$  среды при выдерживании цементного камня в растворах соляной кислоты различной концентрации в течение 28 сут. Содержание ЦСП в цементном камне 20%. Диаметр гранул ЦСПО, 315 мм

Установлено, что при контакте бетона с водным раствором кислоты ( $\text{HCl}$ ) происходит разрушение гидросиликата кальция и других гидратных фаз с образованием гидроксида кальция, растворимость которого при температуре 18–20 °С равна 1,1 г/л.  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  переносится в раствор, что приводит к повышению  $\text{pH}$ .



Образовавшийся гидроксид кальция при переходе в раствор частично нейтрализуется кислотой. Чем выше концентрация кислоты в растворе, тем активнее происходит реакция нейтрализации, что отражается на понижении  $\text{pH}$  раствора. Последнее может происходить за счет увеличения содержания микрокремнезема и ЦСП в цементном камне. В цементном связующем содержание  $\text{CaO}$  составляет около 65%, а в ЦСП Атяшевского месторождения – до 7,16%. Поэтому при увеличении степени напол-

нения до 30% от массы цемента наблюдается снижение  $\text{pH}$  до 9 вместо 11. Хлорид кальция, образовавшийся при взаимодействии  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с  $\text{HCl}$ , хорошо растворяется в воде, поэтому почти полностью вымывается из пор бетона и не оказывает большого влияния на равновесие «бетон – кислота». Разрушение гидросиликата кальция приводит к образованию геля кремнекислоты  $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , который отличается малой растворимостью в воде (около 0,01 г/л) по сравнению с  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Поэтому почти весь гель кремнекислоты остается в порах бетона, вызывая их частичное закупоривание (кольматацию). Таким образом, процесс коррозии бетона становится в определенный период времени самотормозящимся. Чем больше образуется геля кремнекислоты, тем сильнее тормозится процесс коррозии во времени, но он не останавливается.

Эти выводы подтверждают графики изменения прочности при сжатии цементных композитов, наполненных ЦСП (рис. 2).

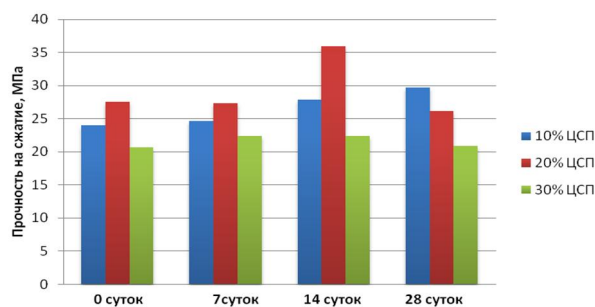


Рис. 2. Влияние степени наполнения ЦСП на прочность при сжатии цементных композитов, обработанных 1% соляной кислотой

Результаты испытаний свидетельствуют, что наибольшую прочность имеют образцы, выдержанные в кислоте с меньшей концентрацией (1%). При экспонировании образцов в течение 7, 14 сут прочность образцов повышается за счет образования в порах геля кремнекислоты, который закупоривает их, уплотняет материал и препятствует дальнейшему проникновению агрессивной среды вглубь цементного камня. На 14-е сутки выдерживания цементного камня в 1%  $\text{HCl}$  прочность составила 35,2 МПа. Нарастание объема геля кремнекислоты на 28-е сутки приводит к разрыву пор, разрушению структуры и к понижению прочности.

На рисунках 3 и 4 приведены данные изменения массы образцов при экспонировании в 1% растворе  $\text{HCl}$  и 25% водном растворе  $\text{NaCl}$ .

На рисунке 5 приведены графики накопления ионов кальция в фильтрате при экспонировании образцов в водном растворе 1%, 2%, 3%  $\text{HCl}$ . Комплексный анализ графиков показывает, что в 1% водном растворе процессы кольматации и вымывания гидроксида кальция стабилизируются на 14-е сутки

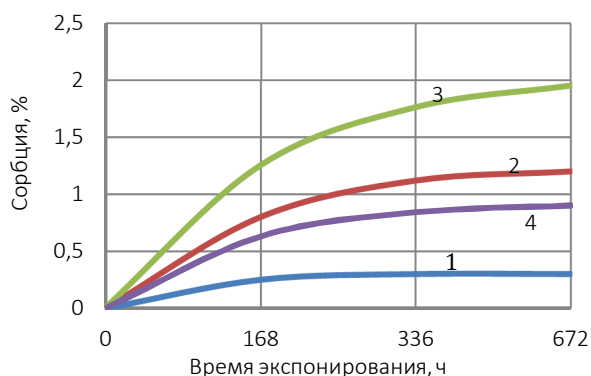


Рис. 3. Графики сорбции цементных композитов в 1% водном растворе HCl (1, 2, 3, 4 – номера составов по табл. 1)

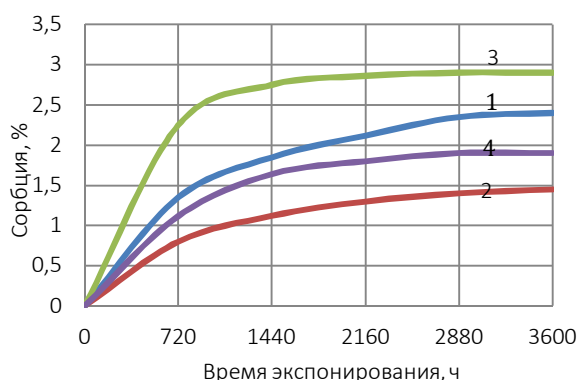


Рис. 4. Графики сорбции цементных композитов в 25% водном растворе NaCl (1, 2, 3, 4 – номера составов по табл. 1)

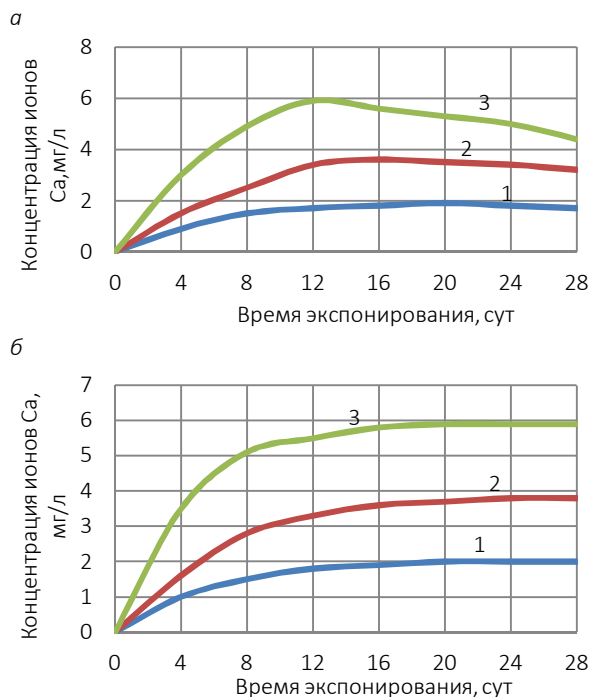


Рис. 5. Содержание ионов кальция в фильтрате после экспонирования цементных композитов в растворах HCl различной концентрации, содержащих: а – ЦСП 10%, б – ЦСП 30%; 1 – HCl 1%, 2 – HCl 2%, 3 – HCl 3%

(336 ч); через 28 сут процессы распада структурных связей и выщелачивания начинают преобладать; кинетика образования новых и разрушения начальных связей зависит от вида цемента и пластификатора; количество ионов  $\text{Ca}^{+2}$  в фильтрате возрастает по мере увеличения концентрации кислоты и длительности контакта «цементный камень – кислота».

Элементный анализ осадка, полученного из цементного камня в процессе контакта его с хлороводородной кислотой по данным энергодисперсного рентгеновского микроанализа, показал, что он преимущественно состоит из оксидов кремния, кальция, железа, содержание которых зависит от концентрации кислоты, содержания ЦСП, продолжительности контакта «цементный камень – кислота».

В таблице 2 представлены результаты анализа содержания оксидов, имеющих важное значение для оценки процесса взаимодействия наполненного цементного камня и кислоты. Установлено, что содержание  $\text{SiO}_2$  в осадке увеличивается по мере роста концентрации хлористоводородной кислоты, а следовательно, с повышением концентрации HCl усиливается процесс разрушения бетона и увеличивается количество геля кремниевой кислоты, который закупоривает поры бетона и образует осадок, наряду с другими оксидами.

Таблица 2 – Результаты анализа осадка

$t$ , сут	ЦСП, %	W(HCl), %	Содержание оксидов, %		
			$\text{SiO}_2$	CaO	$\text{Fe}_2\text{O}_3$
7	10	1	44,65	6,65	17,81
		2	52,26	2,85	24,31
		3	62,66	3,93	14,96
28	10	1	13,48	34,60	3,86
		2	30,72	17,76	13,87
		3	44,67	8,38	13,98
7	20	1	53,95	5,84	15,70
		2	65,31	2,52	13,07
		3	62,66	3,00	8,55
28	20	1	37,91	19,27	11,64
		2	57,70	6,62	9,44
		3	64,35	4,63	8,00
7	30	1	44,44	5,67	7,37
		2	45,00	4,02	5,60
		3	58,99	4,81	4,30
28	30	1	27,02	20,16	11,10
		2	30,90	13,17	4,87
		3	52,65	6,96	4,03

Содержание CaO в осадке понижается по мере увеличения концентрации хлористо-водородной кислоты и продолжительности контакта «бетон – кислота», что, вероятно, связано с явлением кольматации.

Метод растровой электронной микроскопии позволил определить структуру осадков. Установлено, что под действием кислоты на цементный ка-



мень образуются кальциевая соль и аморфные бес-  
связные массы. Образовавшиеся продукты, раство-  
римые в воде, выносятся ею из бетона, нераствори-  
мые же остаются в виде рыхлых масс.

**Выводы.** Основываясь на результатах анализа  
процессов взаимодействия водных растворов со-  
единений хлора с цементным камнем, можно утвер-  
ждать, что разрушение структуры композита в дан-  
ном случае прежде всего лимитируется процессами  
переноса агрессивной среды вглубь материала и хи-  
мического взаимодействия реакционно-способных  
компонентов.

Перенос хлорид-ионов с поверхности в объем  
материала – явление достаточно сложное, и воз-  
можна реализация как фазового, так и диффузион-  
ного механизма. Поэтому для описания кинетики  
продвижения агрессивной среды в глубь изделия  
предлагается использовать феноменологическую  
модель обобщенной проводимости, согласно кото-  
рой величина потока  $J$  прямо пропорциональна гра-  
диенту субстанции  $\omega$ :

$$J = D_m \text{grad}(\omega),$$

где  $D_m$  – коэффициент (показатель) эффективной  
проводимости.

#### Библиографический список

1. Леонович, С. Н. Механика долговечности кон-  
струкционного бетона: новый подход к явлению деграда-  
ции. Часть 3. Интегрированное моделирование поврежде-  
ния солями и карбонизацией / С. Н. Леонович // Строи-  
тельные материалы. – 2025. – № 1-2. – С. 39-44. – DOI  
10.31659/0585-430X-2025-832-1-2-39-44. – EDN ZPRPTY.
2. Леонович, С. Н. Долговечность железобетонных  
сооружений в морской среде / С. Н. Леонович, Л. В. Ким //   
Железобетонные и каменные конструкции: настоящее и  
будущее : Сборник тезисов докладов Международной  
научной конференции, посвященной 50-летию кафедры  
"Железобетонные и каменные конструкции" и 105-летию  
Казанской школы железобетона, Казань, 12–15 ноября  
2024 года. – Казань: Казанский государственный архитек-  
турно-строительный университет, 2024. – С. 11. – EDN  
GFJSFT.
3. Потенциал использования модельных и реаль-  
ных значений действующих факторов окружающей среды  
в вопросах прогнозирования долговечности строительных  
материалов, изделий и конструкций / Т. А. Низина, Д. Р. Ни-  
зин, В. П. Селяев [и др.] // Фундаментальные поисковые и  
прикладные исследования РААСН по научному обеспече-

нию развития архитектуры, градостроительства и строи-  
тельной отрасли Российской Федерации в 2022-2023 годы  
: Научные труды РААСН. В 2-х томах. – Москва : Изда-  
тельство АСВ, 2024. – С. 315-324. – EDN GNVJUN.

4. Селяев, В. П. Деградация цементных композитов  
под действием растворов карбоновых кислот / В. П. Се-  
ляев, Л. И. Куприяшклина // Эксперт: теория и практика. –  
2025. – № 1(28). – С. 185-189. – DOI  
10.51608/26867818\_2025\_1\_185. – EDN OEHRFC.

5. Оценка остаточного ресурса железобетонных из-  
гибаемых элементов, подверженных действию хлоридной  
коррозии / В. П. Селяев, П. В. Селяев, М. Ф. Алимов, Е. В.  
Сорокин // Стр-во и реконструкция. – 2017. – № 6. – С. 49–  
59.

6. Селяев, В. П. Образование продольных трещин в  
железобетонных конструкциях при эксплуатации в усло-  
виях хлоридной коррозии арматуры / В. П. Селяев, А. К.  
Осипов, П. В. Селяев // Регион. архитектура и стр-во  
[Пенза]. – 2016. – № 1 (26). – С. 78–85.

7. Леонович, С. Н. Моделирование хлоридной  
агрессии на высококачественный бетон для обеспечения  
расчетного срока эксплуатации / С. Н. Леонович, А. В. Сте-  
панова // Долговечность строительных материалов, изде-  
лий и конструкций : материалы Всерос. науч.-техн. конф.,  
посвящ. 70-летию заслуж. деятеля науки Рос. Федерации,  
акад. РААСН, д-ра техн. наук проф. В. П. Селяева / редкол.:  
В. В. Петров [и др.]. – Саранск : Изд-во Мордов. ун-та, 2014.  
– С. 56–66.

8. Шейкин, А. Е. Структура и свойства цементных  
бетонов / А. Е. Шейкин, Ю. В. Чеховский, М. И. Бруссер. –  
М. : Стройиздат, 1979. – 344 с.

9. Волкова, С. Н. Перколяционная модель деграда-  
ции композиционных материалов / С. Н. Волкова // Эк-  
сперт: теория и практика. – 2024. – № 4(27). – С. 21-24. – DOI  
10.51608/26867818\_2024\_4\_21. – EDN NDLYOY.

10. Анканова, Т. В. Совершенствование методики  
расчета констант кинетики твердения, основанной на тео-  
рии переноса / Т. В. Анканова, Ш. М. Рахимбаев // Изве-  
стия высших учебных заведений. Северо-Кавказский ре-  
гион. Технические науки. – 2024. – № 1(221). – С. 106-112.  
– DOI 10.17213/1560-3644-2024-1-106-112. – EDN ISZWO.

11. Моделирование работы железобетонных кон-  
струкций при совместном воздействии механических и хи-  
мических нагрузок / В. П. Селяев, П. В. Селяев, С. Ю. Гряз-  
нов [и др.] // Фундаментальные, поисковые и прикладные  
исследования РААСН по научному обеспечению развития  
архитектуры, градостроительства и строительной отрасли  
Российской Федерации в 2021 году : Сборник научных тру-  
дов РААСН / Российская академия архитектуры и строи-  
тельных наук. Том 2. – Москва : Издательство АСВ, 2022. –  
С. 421-433. – EDN FOJPON.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.  
Статья поступила в редакцию 30.01.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication.  
The article was submitted 30.01.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.

Научная статья

УДК 69.059

ГРНТИ: 67.09 Строительные материалы и изделия

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\_1\_65

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ВНЕШНИМ КОМПОЗИТНЫМ АРМИРОВАНИЕМ ПРИ ИЗГИБЕ С КРУЧЕНИЕМ

© 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: 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)

SPIN: 7537-4724

**КАШУБА Сергей Олегович**

аспирант  
*Белгородский государственный технологический университет  
имени Владимира Григорьевича Шухова*  
(Россия, Белгород, e-mail: kashuba\_servey@mail.ru)

**Аннотация.** В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований по изучению прочностных характеристик железобетонных конструкций, усиленных внешним композитным армированием, при одновременном воздействии изгибающих и крутящих моментов. Использование композитных материалов в качестве внешнего армирования демонстрирует ряд существенных преимуществ. Прежде всего, значительно повышается несущая способность конструкций, увеличивается их жёсткость, а также обеспечивается эффективная защита внутренней стальной арматуры от коррозии, что существенно продлевает срок службы сооружений. В ходе исследования были испытаны различные серии экспериментальных образцов. Их ключевыми отличиями являлись ориентация волокон композитного материала и временной промежуток между началом нагружения конструкции и нанесением армирующего слоя. Основной целью экспериментов было исследование влияния ориентации волокон композита и времени нанесения армирующего слоя на механические характеристики и деформационное поведение железобетонных элементов. Полученные результаты позволили оценить прочностные характеристики усиленных конструкций, проанализировать их деформативные свойства и сформировать научно обоснованные рекомендации для проектирования и эксплуатации железобетонных конструкций с внешним композитным армированием. Таким образом, исследование предоставляет комплексное понимание методов экспериментального изучения, характеристик исследуемых образцов и ключевых выводов относительно эффективности применения внешнего композитного армирования при комбинированном воздействии изгиба и кручения.

**Ключевые слова:** железобетонные конструкции; внешнее композитное армирование; сопротивление кручению с изгибом; прочность; сложное напряженно-деформированное состояние; пространственная трещина; усиление

**Для цитирования:** Меркулов С.И., Есипов С.М., Кошуба С.О. Экспериментальные исследования прочности железобетонных конструкций с внешним композитным армированием при изгибе с кручением // Эксперт: теория и практика. 2026. № 1 (32). С. 65-71. doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_65.



Original article

EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRENGTH OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES WITH EXTERNAL COMPOSITE REINFORCEMENT DURING BENDING WITH TORSION

© 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)*

**ESIPOV Stanislav Maksimovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
*BSTU named after V.G. Shukhov  
(Russia, Belgorod)*

**KASHUBA Sergey Olegovich**

PhD Candidate  
*BSTU named after V.G. Shukhov  
(Russia, Belgorod)*

**Abstract.** This paper reports the findings from experimental investigations into the strength properties of reinforced concrete elements strengthened with external composite reinforcement, subjected to simultaneous bending and torsional loads. Employing composite materials for external reinforcement offers several key benefits. Primarily, it substantially boosts the load-bearing capacity of structures, enhances their stiffness, and provides reliable shielding for internal steel rebar against corrosion, thereby greatly prolonging the structures' lifespan. The research involved testing multiple series of specimen samples, distinguished mainly by the fiber alignment in the composite material and the duration between initial loading and the attachment of the strengthening layer. The primary objective of these tests was to examine how the composite fiber orientation and the timing of the strengthening layer's application influence the mechanical performance and deformation patterns of the reinforced concrete components. The results enabled an assessment of the strengthened structures' strength attributes, an analysis of their deformation traits, and the development of evidence-based guidelines for designing and maintaining reinforced concrete elements with external composite reinforcement. Overall, the study delivers a thorough insight into the experimental methodologies, the properties of the tested specimens, and the principal findings on the efficacy of external composite reinforcement under combined bending and torsion.

**Keywords:** reinforced concrete structures; external composite reinforcement; resistance to bending torsion; strength; complex stress-strain state; spatial crack; reinforcement

**For citation:** Merkulov S.I., Esipov S.M., Kashuba S.O. Experimental studies of the strength of reinforced concrete structures with external composite reinforcement during bending with torsion // Expert: theory and practice. 2026. № 1 (32). Pp. 65-71. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2026\_1\_65.

**Введение.** В современном строительстве наблюдается тенденция к использованию конструкций со сложными геометрическими формами, что требует инновационных подходов к их проектированию и конструированию. Для обеспечения безопасной эксплуатации зданий при сохранении экономической эффективности необходимо применять передовые методики проектирования.

Важным этапом жизненного цикла любого строительного объекта является реконструкция. В процессе восстановления или модернизации может изменяться расчётная схема здания, что приводит к трансформации принципов работы отдельных конструкций. Например, в центрально нагруженных колоннах может появиться эксцентриситет, а в изгибаемых элементах —

возникнуть кручение. Даже при сохранении исходной расчётной схемы отдельные элементы здания часто нуждаются в повышении несущей способности с учётом технико-экономических показателей.

Эффективным решением при усилении повреждённых железобетонных конструкций стало применение внешнего композитного армирования. Этот метод отличается компактностью и простотой реализации [1-2]. Особенно актуальным становится усиление при сложных напряжённых состояниях, включая сочетание изгиба и кручения. Однако существующие нормативные документы не содержат чётких указаний по проектированию усиления железобетонных конструкций при одновременном действии изгибающего и крутящего моментов.

Значительный вклад в изучение данной проблематики внесли исследования прочности и деформативности изгибаемых железобетонных элементов с внешним композитным армированием [4-7]. В ходе испытаний обычных и усиленных балок удалось получить диаграммы прогибов и углов закручивания, выявить основные виды разрушений, включая разрыв армирования, отслоение композита и разрушение бетона. Было установлено, что угол между продольными осями элемента и композита в значительной мере влияют на прочность.

В исследованиях [8-10] подробно рассмотрено поведение железобетонных двутавровых и прямоугольных балок при изгибе под действием статических и динамических нагрузок. Полученные данные показали, что направление волокон армирующих материалов и способ их нанесения сильно сказываются на перераспределении напряжений в нормальных и наклонных сечениях, что в итоге увеличивает предельный момент и срок службы конструкций.

Детальный анализ микро- и макродеформаций балок при нагрузках [11-12] позволил разработать рекомендации по оптимальному выбору армирующих материалов и технологии монтажа.

Исследования [13-17] были посвящены вопросам совместной работы элементов усиления с бетоном и выбор оптимальных адгезионных составов. Исследования показали необходимость качественной подготовки поверхности железобетонных элементов и учёта предыстории нагружений.

Использование сверхвысокомодульных преднатяжённых материалов для усиления были проанализированы в работах [18-20]. Хотя теоретически такой подход обещает более высокие результаты, особенно в плане жёсткости, его практическое применение ограничено сложностью технологии, высокой стоимостью и необходимостью практически полного демонтажа элемента.

Большинство исследователей в своих работах делают вывод о том, что наиболее эффективным способом усиления является внешнее полимеркомпозитное армирование с рациональной ориентацией волокон, использованием клеевых составов повышенной жёсткости и анкеровкой внешнего армирования за расчетное сечение, определяемое в зависимости от погонной жёсткости композита и класса прочности бетона. В связи с этим актуальными остаются экспериментальные и теоретические исследования сопротивления железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами при изгибе с кручением.

**Методология.** В процессе исследования работы железобетонных конструкций, усиленных внешним композитным армированием при воздей-

ствии изгиба с кручением, была проведена значительная методологическая работа, включающая разработку методики экспериментальных исследований [1], проектирование и создание комплекса для испытаний строительных конструкций на изгиб с кручением при статическом длительном и кратковременном воздействии [2], а также проведение верификации работы испытательного комплекса [3].

Переменная величина момента усиления (0%, 25%, 50% от разрушающего момента) была принята по среднестатистическим значениям изгибающих моментов в эксплуатируемых конструкциях, где 25%  $P_{кр}$  – при загрузке постоянными нагрузками, 50%  $P_{кр}$  – при загрузке постоянными и временными нагрузками.

Описание параметров экспериментальных образцов представлено в таблице 1, а их опалубочные и арматурные чертежи приведены на рисунках 1–3.

Таблица 1 – Серии и характеристики экспериментальных образцов

Серия образца	h, мм	b, мм	L, мм	Вариант усиления	Момент усиления	Разрушающая нагрузка
Б0-0	200	100	1720	-(рис. 1)	-	$P_{кр}$
Б1-0				Нижняя грань и U-образные хомуты (рис. 2)	0% $P_{кр}$	-
Б1-1					25% $P_{кр}$	
Б1-2					50% $P_{кр}$	
Б2-0				Нижняя грань и диагональные хомуты (рис. 3)	0% $P_{кр}$	
Б2-1					25% $P_{кр}$	
Б2-2					50% $P_{кр}$	

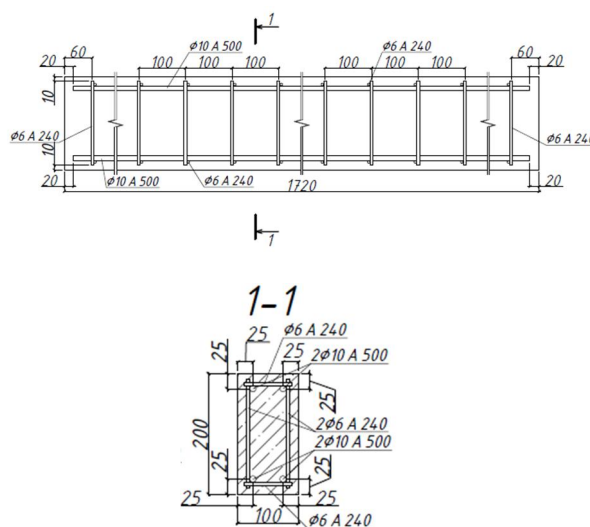


Рисунок 1 – Схема изготовленных железобетонных балок серии Б0

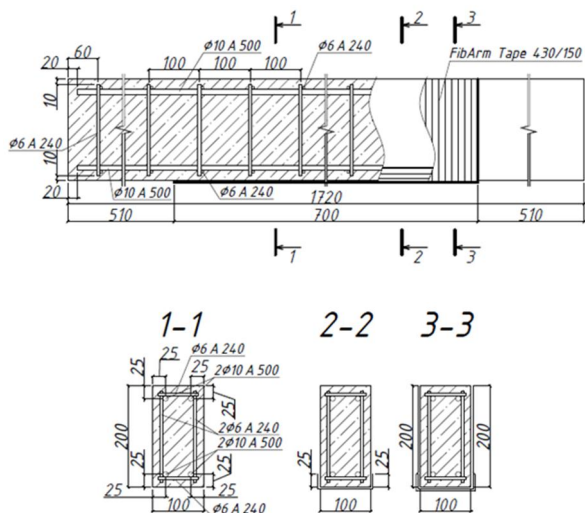


Рисунок 2 – Схема изготовленных железобетонных балок серии Б1

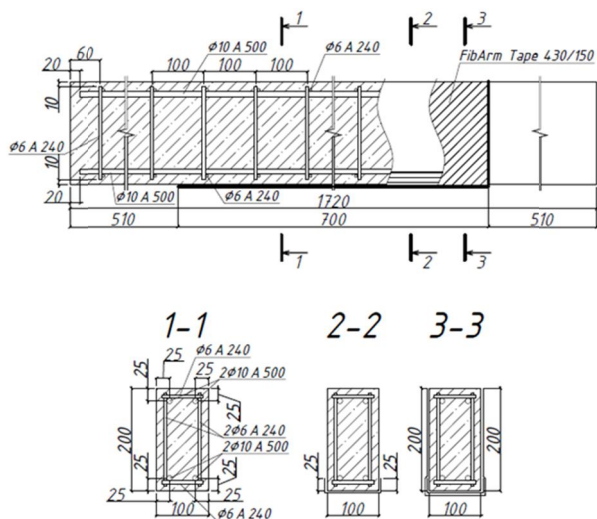


Рисунок 3 – Схема изготовленных железобетонных балок серии Б2

Для определения напряжения в теле бетона в середине пролета образца установлены электротензорезисторы, расположенные с двух сторон балки, в сжатой зоне, для определения ее высоты, параллельно друг другу с шагом 25 мм, в растянутой зоне под углом 45° друг к другу (рисунок 4). Установка датчиков произведена на бетон.

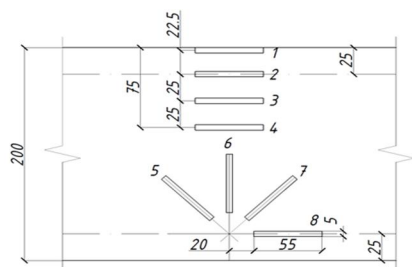


Рисунок 4 – Схема расстановки электротензорезисторов на боковой грани

В процессе проведения экспериментальных исследований был выбран шаг нагружения, составляющий 100 кг, что эквивалентно примерно 3% от разрушающей нагрузки для балки без усиления. Необходимый уровень нагрузки обеспечивался работой гидравлического домкрата в сочетании со станцией. Эксперименты проводились до полного исчерпания несущей способности всех исследуемых образцов.

В качестве рассматриваемых параметров приняты: показания электротензорезисторов продольных деформаций: 1 (рисунок 5); 8 (рисунок 6); 7 (рисунок 7); 5 (рисунок 8). Нумерация датчиков принята по рисунку 4.

Критерием разрушения балки служило состояние, при котором, с последующем увеличением нагрузки, происходят пластические деформации, препятствующие восприятию нагрузки.

**Результаты и обсуждение.** Анализируя рисунки 5-6, можно сделать выводы о схожей работе сжатой зоны сечений под нагрузкой. На уровне нагружения соответствующему не усиленному образцу, балки серий Б1-0 показывают уменьшение деформаций сжатой зоны на 21%, Б1-2 на 27%, Б2-0 на 27%, Б2-1 на 5%, Б2-2 на 7%, Б1-1 увеличение на 1%.

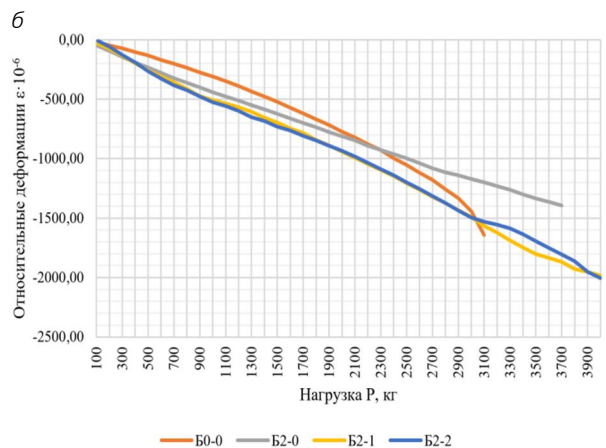
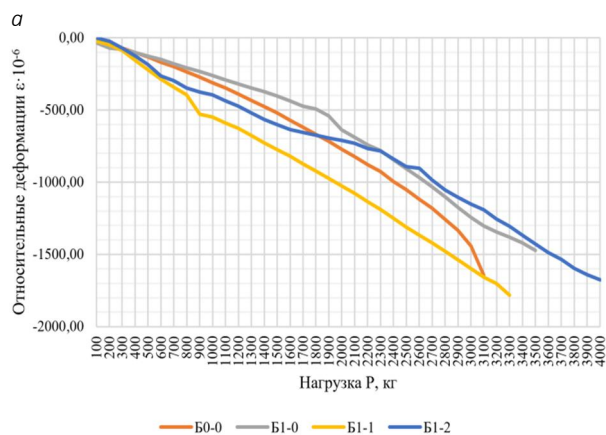


Рисунок 5 – Сравнение относительных деформаций датчика 1 балок: а – серий Б0 и Б1, б – серий Б0 и Б2

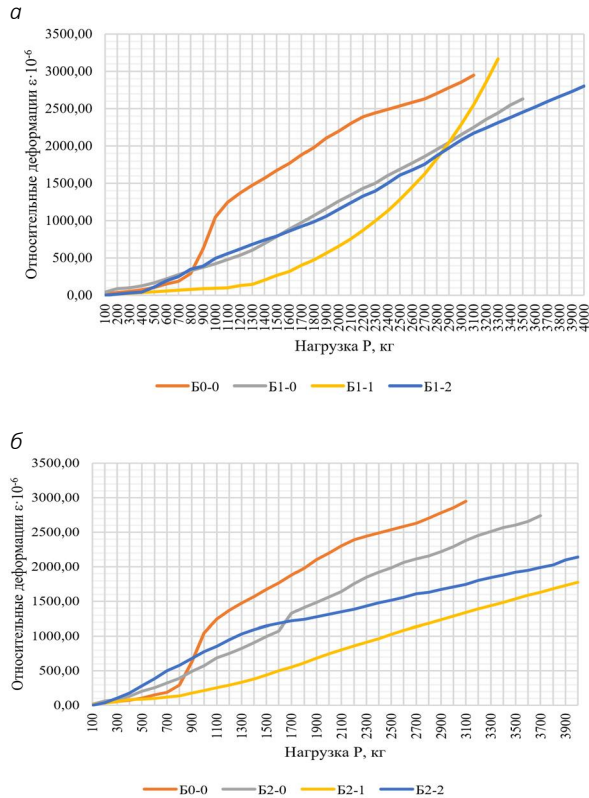


Рисунок 6 – Сравнение относительных деформаций датчика 8 балок: а – серий Б0 и Б1, б – серий Б0 и Б2

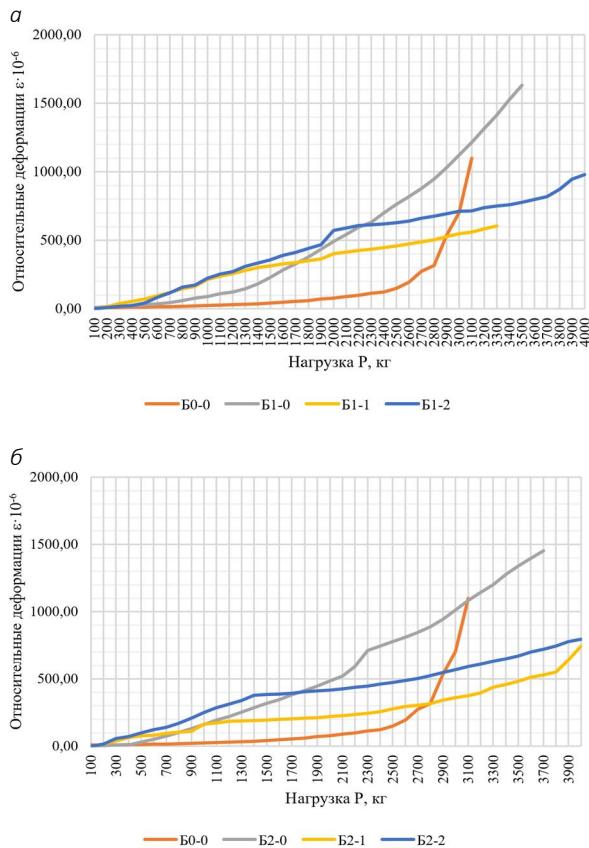


Рисунок 7 – Сравнение относительных деформаций датчика 7 балок: а – серий Б0 и Б1, б – серий Б0 и Б2

Наиболее ощутимый эффект получен в растянутой зоне. На уровне нагружения соответствующему не усиленному образцу, балки серий Б1-0 показывают уменьшение деформаций растянутой зоны на 24%, Б1-1 на 13%, Б1-2 на 26%, Б2-0 на 19%, Б2-1 на 54%, Б2-2 на 41%.

Из рассматриваемого ряда зависимостей выделяются графики серий Б2-1 и Б2-2, к моменту исчерпания несущей способности которых продольные деформации сжатия начали существенно возрастать, при незначительном увеличении деформаций растяжения. Данная закономерность привела к смещению нейтральной оси в сторону растянутой грани.

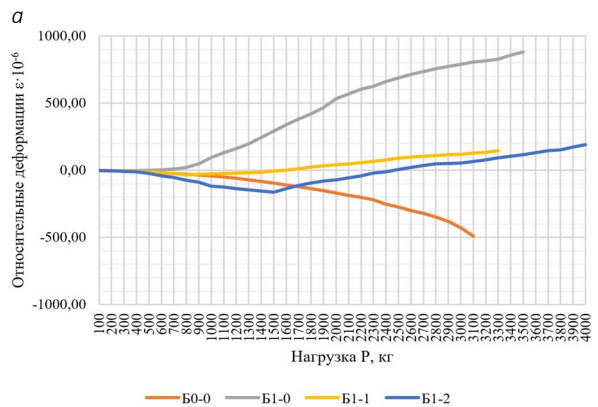


Рисунок 8 – Сравнение относительных деформаций датчика 5 балок: а – серий Б0 и Б1, б – серий Б0 и Б2

Анализируя рисунки 7-8, можно сделать выводы об изменении направления напряжений в сечении, после включения в работу композитного армирования.

На уровне нагружения соответствующему не усиленному образцу, балки серий Б1-1 показывают уменьшение деформаций датчика 7 на 49%, Б1-2 на 35%, Б2-0 на 1%, Б2-1 на 66%, Б2-2 на 46%, Б1-0 увеличение на 10%.

Все усиленные образцы в направлении датчика 5 поменяли направления деформаций со сжатия на растяжение.



Для серий Б1-0 и Б2-0, усиленных без предварительного нагружения, диагональные датчики 5 и 7 показывают растягивающие деформации, сопоставимые с критическим значением датчика 7 для не усиленного образца в пределах  $-25\% +10\%$ .

Для серий Б1-1, Б1-2, Б2-1 и Б2-2 в момент разрушения деформации датчика 7 меньше, чем для не усиленного образца на 45%, 11%, 32% и 28% соответственно. При этом, деформации датчика 5 показывают растягивающие напряжения, находящиеся в диапазоне от 13% до 30% от значения деформаций датчика 7 в момент разрушения не усиленного образца.

Выявленные закономерности свидетельствуют об уменьшении напряжения в пространственном сечении, а также уменьшение влияния кручения, при сопротивлении изгибу с кручением конструкций, усиленных внешним композитным армированием. При этом образцы, усиленные без предварительного нагружения, показали худший результат, чем элементы, усиленные под нагрузкой.

Угол поклейки хомутов также сказался на сопротивлении конструкций изгибу с кручением. Во всех случаях поклейки хомутов перпендикулярно спиральной трещине, деформации в направлении датчика 7 были меньше, чем для поперечных хомутов. Для серии усиленной без нагружения на 11% (на уровне разрушения); для серии, усиленной под нагрузкой 25% - на 28% (на уровне разрушения образца Б1-1); для серии, усиленной под нагрузкой 50% - на 19% (на уровне разрушения).

Фотографии разрушения образцов Б0-0, Б1-0 и Б2-0 приведены на рисунках 9, 10 и 11 соответственно.



Рисунок 9 – Разрушение образца Б0-0



Рисунок 10 – Разрушение образца Б1-0



Рисунок 11 – Разрушение образца Б0-0

Рассматривая фотографии 9-11 можно сделать выводы об изменении характера разрушения для различных серий. В случае с неусиленным образцом (серия Б0-0) – это потеря несущей способности арматуры и бетона в зоне чистого изгиба по пространственному сечению. Для образцов усиленных без анкеровки (серии Б1-0, Б1-1) – срез бетона в зоне контакта бетон-композит, с последующей потерей прочности бетона и арматуры в зоне передачи нагрузки по пространственному сечению. Для балок, усиленных с заводом композита усиления за зону передачи нагрузки (серии Б1-2, Б2) – срез бетона в зоне передачи усилия с холстов усиления по наклонному сечению.

#### Выводы

1. Силовое сопротивление железобетонных элементов, испытывающих изгиб с кручением можно существенно увеличить способом нанесения полимеркомпозитного внешнего армирования на нижнюю и боковые грани. Экспериментально установлено, что критические значения линейных деформаций в сжатой зоне у усиленных конструкций достигаются с запасом прочности от 0% до 27% относительно неусиленных аналогов; в растянутой зоне с запасом прочности от 13% до 54% относительно неусиленных аналогов;

2. Конструктивное исполнение усиления непосредственно влияет на несущую способность испытываемых образцов. При включении внешнего композитного армирования характер разрушения меняется, что свидетельствует о перераспределении внутренних усилий в исследуемых элементах и необходимости расчета дополнительных вариантов разрушения;

3. Применение хомутов диагонального типа (перпендикулярные спиралевидной трещине) обеспечивает более высокие и стабильные результаты в части деформативности и несущей способности;

4. Имеет место необходимость решения ключевых задач, таких как оптимизация структуры и свойств композитных материалов, повышение адгезии между армированием и бетоном, создание новых методов нанесения композитных слоев, а также разработка комплексных методик расчета и проектирования конструкций с учетом многокомпонентных воздействий.



**Библиографический список**

1. Верификация методики испытаний железобетонного элемента при изгибе с кручением в условиях длительной эксплуатации / С. И. Меркулов, Л. А. Сулейманова, С. М. Есипов [и др.] // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2024. – № 12. – С. 37-46. – DOI 10.34031/2071-7318-2024-9-12-37-46. – EDN SZWKNI.
2. Патент № 2803397 С1 Российская Федерация, МПК G01N 3/20. комплекс для испытаний строительных конструкций на изгиб с кручением при статическом длительном и кратковременном воздействии: № 2023111640: заявл. 04.05.2023; опубл. 12.09.2023 / С. И. Меркулов, С. М. Есипов, С. О. Кашуба, И. С. Рябчевский; заявитель федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова".
3. Меркулов, С. И. Программа и методика экспериментальных исследований железобетонных элементов с внешним армированием композитными материалами при изгибе с кручением / С. И. Меркулов, С. О. Кашуба, С. М. Есипов // Строительство и реконструкция. – 2023. – № 6(110). – С. 50-57. – DOI 10.33979/2073-7416-2023-110-6-50-57.
4. Демьянов, А.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом и анализ их результатов / А.И. Демьянов, А.С. Сальников, В.И. Колчунов // Строительство и реконструкция. 2017. № 4(72). С. 17-26.
5. Колчунов, В.И. Результаты экспериментальных исследований трещинообразования железобетонных конструкций при кручении с изгибом / В.И. Колчунов, А.С. Сальников // Строительство и реконструкция. 2016. № 6(68). С. 22-28.
6. Демьянов, А.И. Экспериментальные исследования железобетонных конструкций при кручении с изгибом / А.И. Демьянов, А.А. Покусаев, В.И. Колчунов // Строительство и реконструкция. 2017. № 5(73). С. 5-14.
7. Демьянов, А.И. Некоторые результаты экспериментальных исследований составных железобетонных конструкций при кручении с изгибом / А.И. Демьянов, Н.В. Наумов, В.И. Колчунов // Строительство и реконструкция. 2018. № 5(79). С. 13-23.
8. Сальников, А. С. Расчетная модель образования пространственных трещин первого вида в железобетонных конструкциях при кручении с изгибом / А.С. Сальников, В.И. Колчунов, И.А. Яковенко // Промышленное и гражданское строительство. 2015. № 3. С. 35-40.
9. Меркулов, С.И. Экспериментальные исследования сцепления внешней композитной неметаллической арматуры с бетоном / С.И. Меркулов, С.М. Есипов // Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения. 2017. № 1. С. 93-97.
10. Римшин, В.И. Бетонные конструкции, усиленные композитным материалом / В.И. Римшин, С.И. Меркулов, С.М. Есипов // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 2(35). С. 93-100. DOI 10.5281/zenodo.1286034.
11. Есипов, С.М. Критерии совместности работы композитного внешнего армирования и железобетонной конструкции при силовых воздействиях / С.М. Есипов, Д.В. Есипова // Международный студенческий строительный форум - 2018 (к 165-летию со дня рождения В.Г. Шухова) : Сборник докладов. В 2-х томах, Белгород, 26 ноября 2018 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2018. С. 64-69.
12. Меркулов, С.И. Бетонные конструкции с неметаллической композитной арматурой / С.И. Меркулов, С.М. Есипов // Безопасность строительного фонда России проблемы и решения: материалы Международных академических чтений, Курск, 15 ноября 2019 года. – Курск: Курский государственный университет, 2019. С. 218-226.
13. Кузнецова, М.С. Особенности расчета железобетонных изгибаемых элементов, усиленных композитными материалами / М.С. Кузнецова, М.В. Попова // Дни науки студентов ИАСЭ - 2021 : Материалы научно-практической конференции, Владимир, 22 марта – 09 2021 года. – Владимир: Владимирский государственный университет, 2021. С. 178-181.
14. Гаврилова, Е.О. Усиление изгибаемых элементов композиционными материалами / Е.О. Гаврилова // Академическая публицистика. 2021. № 8-2. С. 111-119.
15. Волик, А.Р. Экспериментальные исследования железобетонных балок с внешним армированием растянутой грани композитными тканями / А.Р. Волик, Я.Я. Новицкий // Вестник Гродненского государственного университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2022. Т. 12. № 1. С. 117-125.
16. Исследование физико-механических характеристик модифицированных клеевых связующих для систем внешнего армирования строительных конструкций / И.А. Старовойтова, А.Р. Шакиров, Е.С. Зыкова [и др.] // Строительные материалы. 2021. № 1-2. С. 98-104. – DOI 10.31659/0585-430X-2021-788-1-2-98-104.
17. Карась, М.С. Экспериментальные исследования несущей способности железобетонных балок, усиленных композитными тканями в середине пролёта / М.С. Карась, Р.О. Кушель // Традиции, современные проблемы и перспективы развития строительства : Сборник научных статей, Гродно, 13–14 мая 2021 года. – Гродно: Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, 2021. С. 122-125.
18. Рубин, О.Д. Экспериментальные исследования напряженно-деформированного состояния железобетонных конструкций, усиленных предварительно напряженной базальтокомпозитной арматурой / О.Д. Рубин, С.Е. Лисичкин, О.В. Зюзина // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2021. Т. 17. № 3. С. 288-298. – DOI 10.22363/1815-5235-2021-17-3-288-298.
19. Курнавина, С.О. Поле направлений трещин в железобетонных изгибаемых элементах, усиленных композитными материалами / С.О. Курнавина, М.Д. Антонов // Строительство и реконструкция. 2020. № 1(87). С. 3-13. DOI 10.33979/2073-7416-2020-87-1-3-13.
20. Балдин, Д.Ю. Сравнительный анализ способов усиления железобетонных тавровых балок / Д.Ю. Балдин, А.Н. Краев, Е.А. Жайсамбаев // Транспортные сооружения. 2020. Т. 7. № 2. С. 3. DOI 10.15862/05SATS220.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 05.02.2026; одобрена после рецензирования 17.03.2026; принята к публикации 17.03.2026.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 05.02.2026; approved after reviewing 17.03.2026; accepted for publication 17.03.2026.

## 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 (ют) 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](mailto:expert763@mail.ru)

Статью высылать по адресу: [expert763@mail.ru](mailto: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 раньше 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**  
**№ 1 (32) 2026 г.**

Главный редактор - Мурашкин Василий Геннадьевич,  
доктор технических наук, АНО "ИССТЭ", Тольятти

---

Scientific and Practical Online Edition

**EXPERT: THEORY AND PRACTICE**  
**№ 1 (32) 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> 25.03.2026.  
Формат 60x84/8. Усл.-печ. л. 8,95.  
Электронные текстовые данные (4,12 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](mailto:expert763@mail.ru).

