

e-ISSN: 2782-7445

p-ISSN: 2686-7818

ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

2025, №4 (31)

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.

е-ISSN: 2782-74445; 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.



©2025 Контент доступен по лицензии CC BY-NC 4.0

This is an open access article under the CC BY-NC 4.0 license

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

Редакционный совет:

ПЕТРОВ Владилен Васильевич – председатель редакционного совета, академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, Саратовский государственный технический университет им. Ю.А. Гагарина
АКИМОВ Павел Алексеевич – академик РААСН, профессор, доктор технических наук, ректор Московского государственного строительного университета
АХМЕДОВА Елена Александровна – академик РААСН, доктор архитектуры, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, заведующая кафедрой «Градостроительство», Самарский государственный технический университет
БЕККЕР Александр Тевьевич – академик РААСН, Заслуженный работник высшей школы РФ, доктор технических наук, профессор, научный руководитель Политехнического института Дальневосточного федерального университета (Владивосток, Россия)
БЕЛОСТОЦКИЙ Александр Михайлович – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, Московский государственный строительный университет
ГАДЖИЕВ Мухлис Ахмед оглы – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции», Азербайджанский университет архитектуры и строительства (Азербайджан, Баку)
ГЕЛЬФОНД Анна Лазаревна – академик РААСН, Заслуженный работник культуры РФ, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, доктор архитектуры, профессор, Нижегородский государственный архитектурно-строительный университет
ЕРОФЕЕВ Владимир Трофимович – академик РААСН, Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, Московский государственный строительный университет
ИЛЬИЧЕВ Владислав Александрович – академик РААСН, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почётный 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 строительство», «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, Почётный 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 государственный технический 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; <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.
e-ISSN: 2782-7445; 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



© 2025 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)

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 Ministry (Moscow, Russia)

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

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

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

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

Редакционная коллегия:

МУРАШКИН Василий Геннадьевич – главный редактор, кандидат 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 Никанорович – 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 технических 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 технических наук, профессор, советник РААСН, проректор по воспитательной работе, Поволжский государственный технологический университет, Йошкар-Ола

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

РАХИМОВ Равиль 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 Гипронииавиапром"

СОЛУЯНОВ Юрий Иванович – доктор технических 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, Candidate 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., CIRP 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. KORO BKO – Dr. of Technical, Prof., Prof. of the Department of Mechatronics, Mechanics and Robotics, Oryol State University named after Turgenev (Oryol, Russia)

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

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 Мурашкина В.Г. с успешной защитой докторской диссертации.....	10
Поздравляем с 75-летием Хританкова В.Ф.	11

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА

РАСЧЁТ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ БИЗОН ППУ-260 ПРИ ВАРИАЦИИ ТОЛЩИН НАСТИЛА И ПРОЛЁТОВ В СООТВЕТСТВИИ С СП260.1325800.2016 АНПИЛОВ Сергей Михайлович, УМНОВА Ольга Владимировна, МАРКИН Игорь Анатольевич.....	16
К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЗОЛЬНОГО НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА БЕЛОВ Владимир Владимирович, КУЛЯЕВ Павел Викторович, БАРКАЯ Темур Рауфович, СОКОЛОВ Сергей Александрович, ШИШАЕВ Денис Сергеевич	28
ПОКАЗАТЕЛЬ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПЛИТ АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ ПАГ-14 БОЙКО Виктор Григорьевич	34
ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕРАБОТАННОГО АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С УЧЕТОМ ПРЕДЕЛА УПРУГОСТИ УПЛОТНЯЕМОГО СЛОЯ ЗУБКОВ Анатолий Федорович, АНДРИАНОВ Константин Анатольевич, ЗАРАПИНА Любовь Сергеевна, МАМОНТОВ Александр Александрович, МАМОНТОВ Семен Александрович, ЕЛЬЧИЩЕВА Татьяна Федоровна	40
ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДЕФОРМАТИВНУЮ СПОСОБНОСТЬ СЛОЯ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА ЗУБКОВ Анатолий Федорович, АНДРИАНОВ Константин Анатольевич, МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович, МАМОНТОВ Александр Александрович, МАМОНТОВ Семен Александрович.....	51
ВЛИЯНИЕ СОСТАВА КОМПЛЕКСНОЙ ДОБАВКИ НА ПРОЧНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННОГО ВЯЖУЩЕГО ИЛЬИНА Лилия Владимировна, ЦЕКАРЬ Денис Анатольевич, МОЛОДИН Владимир Викторович.....	59
АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ ДЕФОРМАЦИЙ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ КОЗЛОВ Александр Вячеславович	67
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ДОБАВКИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА В СОСТАВЕ ГИПСОЦЕМЕНТНО-ПУЦЦОЛАНОВОГО ВЯЖУЩЕГО ВЕЩЕСТВА КРЯЖИКОВ Иван Александрович, ПИЧУГИН Анатолий Петрович	72
АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ И КИНЕТИКУ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. ЧАСТЬ 1 НИЗИНА Татьяна Анатольевна, НИЗИН Дмитрий Рудольфович, ЧИБУЛАЕВ Игорь Александрович, СПИРИН Илья Петрович, ПИВКИН Николай Андреевич	76
ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ НИКОЛЮКИН Алексей Николаевич, АНТОНОВ Василий Михайлович, МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович, ЕЗЕРСКИЙ Валерий Александрович, ЛИСОВСКИЙ Владислав Александрович	86

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ЛОДЖИЙ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ	
РИМШИН Владимир Иванович, ШАЛДИНА Яна Дмитриевна, ЯКУНИН Егор Денисович, ВОРОБЬЕВ Александр Евгеньевич, САВЕЛЬЕВ Егор Сергеевич	98
ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ	
СТЕНЕЧКИНА Ксения Сергеевна, ЕВТУШЕНКО Юрий Михайлович, УШКОВ Валентин Анатольевич, БЕРЛИН Александр Александрович.....	104
ПОЛУЧЕНИЕ БЕЛКОВОГО ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА ЭТИЛОВОГО СПИРТА И РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ПЕНОБЕТОНОВ НА ЕГО ОСНОВЕ	
ЧЕРКАСОВ Василий Дмитриевич, ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Иванович, КИСЕЛЕВ Евгений Викторович.....	114

МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА

Влияние наполнителей на динамические механические свойства композиционных материалов на основе бутилкаучука	
ТАРАСОВА Ольга Ивановна, ЮРКИН Юрий Викторович, АВДОНИН Валерий Викторович, СТРОКИН Андрей Евгеньевич, ДАВТЯН Миша Арменович.....	118

ЭКСПЕРТНОЕ МНЕНИЕ

ИНСТРУМЕНТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПРОГРАММ РАЗВИТИЯ СТРАНЫ	
АНПИЛОВ Сергей Михайлович, МАИЛЯН Левон Рафаэлович, СОРОЧАЙКИН Андрей Никонович	130
КОМПОЗИТНАЯ АРМАТУРА: «ЗА» И «ПРОТИВ»	
ГАБРУСЕНКО Валерий Васильевич.....	136

РЕЦЕНЗИИ

РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНИК «ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ», часть 1 «ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»	
АНПИЛОВ Сергей Михайлович.....	140

НЕКРОЛОГ

УШЕЛ ИЗ ЖИЗНИ ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ КАРПЕНКО.....	142
<i>Условия размещения материалов</i>	<i>144</i>

CONTENT

PERSONALITIES

CONGRATULATIONS TO MURASHKIN V.G. ON THE SUCCESSFUL DEFENSE OF THE DOCTORAL DISSERTATION.....	10
CONGRATULATIONS TO HRITANKOV V.F. ON THE 75TH BIRTHDAY	11

TECHNICAL SCIENCES. BUILDING AND ARCHITECTURE

CALCULATION OF THE STEEL-REINFORCED BEAMS BISON PPU-260 WITH VARIATIONS IN THICKNESS AND SPANS ACCORDING TO SP260.1325800.2016 ANPILOV Sergey Mikhailovich, UMNova Olga Vladimirovna, MARKIN Igor Anatolyevich.....	16
DESIGNING EFFICIENT STRUCTURES FROM ASH NON-AUTOCURED AERATED CONCRETE BELOV Vladimir Vladimirovich, KULIAEV Pavel Viktorovich, BARKAYA Temur Raufovich, SOKOLOV Sergey Aleksandrovich, SHISHAEV Denis Sergeevich	28
INDEX OF FROST RESISTANCE OF CONCRETE AND DURABILITY OF SLABS OF AIRFIELD PAVEMENTS OF PAG-14 BOYKO Viktor Grigorievich.....	34
RATIONALE FOR THE USE OF RECYCLED ASPHALT GRANULATE IN ROAD STRUCTURES, TAKING INTO ACCOUNT THE ELASTIC LIMIT OF THE COMPACTED LAYER ZUBKOV Anatoly Fedorovich, ANDRIANOV Konstantin Anatolyevich, ZARAPINA Lyubov Sergeevna, MAMONTOV Alexander Alexandrovich, MAMONTOV Semyon Alexandrovich, YELCHISHCHEVA Tatyana Fedorovna.....	40
INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE DEFORMABILITY OF THE ASPHALT GRANULATE LAYER ZUBKOV Anatoly Fedorovich, ANDRIANOV Konstantin Anatolyevich, MONASTYREV Pavel Vladislavovich, MAMONTOV Alexander Alexandrovich, MAMONTOV Semyon Alexandrovich, EZERSKY Valery Aleksandrovich	51
INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF A COMPLEX ADDITIVE ON THE STRENGTH AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED CEMENT SYSTEMS ILINA Lilia Vladimirovna, TSEKAR Denis Anatolyevich, MOLODIN Vladimir Viktorovich	59
ALGORITHM FOR CALCULATING THE BENDING MOMENT FUNCTION FROM DEFORMATIONS OF NORMAL CROSS-SECTIONS OF BENDING CONCRETE ELEMENTS USING MATERIAL CONDITION DIAGRAMS KOZLOV Alexander Vyacheslavovich	67
DETERMINATION OF THE OPTIMAL QUANTITY OF MICROSILICA ADDITIVES IN THE COMPOSITION OF A GYPSUM—CEMENT—POZZOLAN BINDER KRYAZHIKOV Ivan Alexandrovich, PICHUGIN Anatoly Petrovich	72
ANALYSIS OF THE EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE CHANGE OF PROPERTIES AND KINETICS OF ACCUMULATION OF DAMAGES IN THE STRUCTURE OF POLYMER MATERIALS UNDER THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS. PART 1 NIZINA Tatiana Anatolyevna, NIZIN Dmitry Rudolfovich, CHIBULAEV Igor Alexandrovich, SPIRIN Ilya Petrovich, PIVKIN Nikolai Andreevich.....	76
PREDICTION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF DRIVEN PILES BASED ON NEURAL NETWORKS NIKOLYUKIN Alexey Nikolaevich, ANTONOV Vasily Mikhaylovich, MONASTYREV Pavel Vladislavovich, EZERSKY Valery Aleksandrovich, LISOVSKY Vladislav Aleksandrovich	86

NEW TECHNOLOGIES FOR RESTORING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS IN LOGGIES OF CIVIL BUILDINGS	
RIMSHIN Vladimir Ivanovich, SHALDINA Yana Dmitrievna, YAKUNIN Egor Denisovich, VOROBYOV Alexander Evgenievich, SAVELIEV Egor Sergeevich.....	98

FIRE DANGER OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS ABSTRACT	
STENETCHKINA Ksenia Sergeevna, YEVTUSHENKO Yuri Mikhailovich, USHKOV Valentin Anatolyevich, BERLIN Alexander Alexandrovich.....	104

PRODUCTION OF PROTEIN FOAMING AGENT FROM SECONDARY PRODUCTS OF ETHYL ALCOHOL PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF FOAM CONCRETE COMPOSITIONS BASED ON IT	
CHERKASOV Vasily Dmitrievich, YEMELYANOV Alexey Ivanovich, KISELYOV Evgeny Viktorovich	114

MECHANICS OF A DEFORMABLE SOLID BODY

INFLUENCE OF FILLERS ON DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON BUTYL RUBBER	
TARASOVA Olga Ivanovna, YURKIN Yuri Viktorovich, AVDONIN Valeriy Viktorovich, STROKIN Andrey Evgen`evich, DAVTYAN Misha Armenovich	118

EXPERT OPINION

TOOLS FOR PRACTICAL IMPLEMENTATION OF STATE DEVELOPMENT PROGRAMS	
ANPILOV Sergey Mikhailovich, MAILYAN Levon Rafayelovich, SOROCHAIKIN Andrey Nikonovich	130
COMPOSITE FITTINGS: PROS AND CONS	
GABRUSENKO Valery Vasilyevich.....	136

REVIEWS

REVIEW OF THE TEXTBOOK "BASICS OF CALCULATION AND DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES", PART 1 "BASICS OF CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES"	
ANPILOV Sergey Mikhailovich.....	140

OBITUARY

NIKOLAI IVANOVICH KARPENKO, AN OUTSTANDING SCIENTIST IN THE FIELD OF CONSTRUCTION SCIENCES, HAS PASSED AWAY.....	142
---	-----

<i>Conditions for posting materials</i>	144
---	-----

ПЕРСОНАЛИИ

ПОЗДРАВЛЯЕМ МУРАШКИНА В.Г. С УСПЕШНОЙ ЗАЩИТОЙ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ



Редакционный совет, Редакционная коллегия и редакция сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика» поздравляют главного редактора Василия Геннадьевича Мурашкина с успешной защитой докторской диссертации!

Сведения по диссертации

Тема: «Деформационная модель для расчета железобетонных эксплуатируемых конструкций» по специальности 2.1.1 – «Строительные конструкции, здания и сооружения».

Место защиты: Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН.

Научный консультант: академик РААСН, доктор технических наук, профессор Травуш В.И.

Официальные оппоненты:

1) Кодыш Эмиль Наумович - доктор технических наук (05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения), профессор, главный научный сотрудник, АО «Центральный научно-исследовательский и проектно-экспериментальный институт промышленных зданий и сооружений - ЦНИИ-Промзданий»;

2) Меркулов Сергей Иванович - доктор технических наук (05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения), член-корреспондент РААСН, профессор, заведующий кафедрой промышленного и гражданского строительства, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Курский государственный университет»;

3) Галютдинов Заур Рашидович - доктор технических наук (2.1.1 – Строительные конструкции, здания и сооружения), доцент, заведующий кафедрой железобетонных и каменных конструкций, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет».

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет».

CONGRATULATIONS TO MURASHKIN V.G. ON THE SUCCESSFUL DEFENSE OF THE DOCTORAL DISSERTATION

The Editorial Board, the editorial panel, and the editors of the online scientific-practical journal "Expert: Theory and Practice" congratulate the chief editor, Vasily Gennadyevich Murashkin, on his successful defense of the doctoral thesis!



ПОЗДРАВЛЯЕМ С 75-ЛЕТИЕМ ХРИТАНКОВА В.Ф.



Поздравляем с 75-летием, члена редакционной коллегии сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика», профессора, доктора технических наук, Заслуженного строителя РФ, Почетного гражданина Новосибирской области Хританкова Владимира Фёдоровича¹.

Владимир Фёдорович – человек-легенда, генеральный директор ГК «Карачинский источник», руководитель санатория «Озеро Карачи», Председатель совета директоров завода ЖБИИК.

Хританков В.Ф. родился 3 октября 1950 года в затерянной среди тайги небольшой деревне Медвеженка, Северного района, Новосибирской области, воспитывался в семье, где было пятеро детей.

Образование: Новосибирский институт инженеров водного транспорта (1967–1972 гг.), Финансово-экономический институт (1989 –1993). Аспирант НСХИ-НГАУ (1991–1994). Защита кандидатской диссертации – 2002 г., защита докторской диссертации – 2009 г., профессор Новосибирского государственного аграрного университета (НГАУ).

Семейное положение: женат, имеет детей: дочь Ирину и сына Андрея. Двух внуков Елену и Екатерину и внуков Алексея и Фёдора.

Трудовая и общественная деятельность: после завершения учебы в институте, по распределению, вернулся в Куйбышев Новосибирской области. Строительное управление 22 треста «Новосибирскоблстрой» (1972–1975 прошёл путь от мастера до

начальника участка), завод ЖБИИК (1975–1982 главный инженер, 1982–2003 директор). Председатель совета директоров завода ЖБИИК, почётный гражданин Новосибирской области, председатель Куйбышевского землячества.

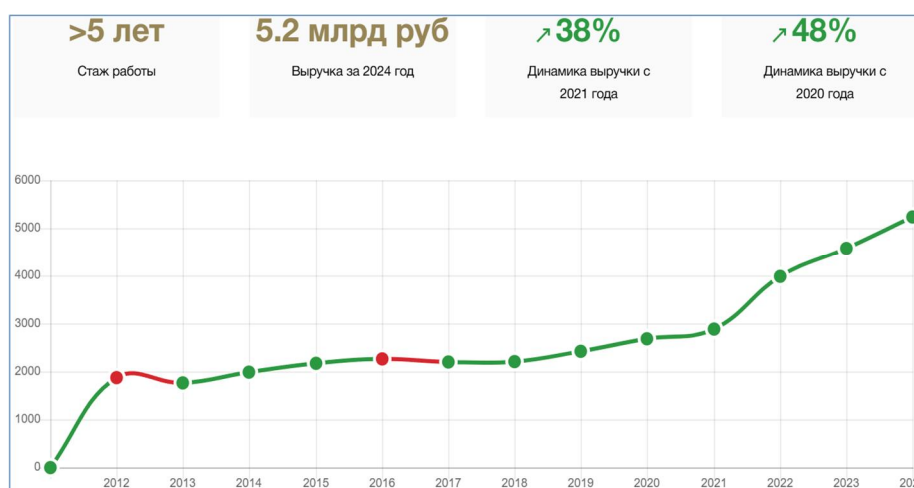
Этот юбилей – прекрасный повод рассказать о масштабе личности нашего лидера. Его жизнь – это воплощение сибирского характера: трудолюбие, стойкость и преданность родной земле. Родившись в большой семье в Северном районе, он с детства впитал главные ценности. Особую роль в его жизни сыграла мама, Вера Андреевна, которую Владимир Фёдорович называет святым человеком и хранительницей семьи. Именно семья всегда была и остается его главной опорой.

Начав карьеру с мастера в «Новосибирскоблстрое», он за три года вырос до начальника участка, а затем возглавил Куйбышевский завод железобетонных изделий в сложные 90-е, сумев не просто спасти предприятие от банкротства, а вывести его в лидеры. Но Владимир Фёдорович – не только выдающийся практик, но и видный ученый! Он не остановился на инженерных победах: в 90-х окончил аспи-

¹Фото, URL: <https://www.sovsibir.ru/news/179653> (дата обращения 10.10.2025)



Семья Хританковых. 1967 год. Фото: семейный архив¹



Участник Рейтинга Генеральных Директоров Владимир Хританков занимает место №2 в отрасли «Другие» по Новосибирской области по состоянию на октябрь 2025 года

рантуру, а в 2000-х годах блестяще защитил докторскую диссертацию по программе «Строительные материалы». Более 22 лет он посвятил преподавательской деятельности, делясь знаниями со студентами в Аграрном университете, а позднее – в Сибстрине. И сегодня он продолжает воспитывать новые поколения инженеров, являясь профессором и членом диссертационного совета по защите кандидатских наук. Он автор и соавтор более 250 научных публикаций, в том числе трех десятков патентов на научно-практические изобретения.

Благодаря профессионализму Владимира Федоровича, качественному и ответственному выполнению должностных обязанностей, целеустремленности и лидерским качествам, ООО "Карачинский ис-

точник" достигло значительных успехов и заняло достойные позиции на рынке других. Так, в 2024 году выручка компании составила 5.2 млрд рублей².

Именно его видение и энергия превратили «Карачинскую» в бренд всероссийского масштаба, а санаторий «Озеро Карачи» и база отдыха на озере Чаны – в жемчужины Сибири. Под его руководством возводятся новые корпуса, развивается логистика и создаются сельскохозяйственные предприятия, обеспечивая Новосибирский регион рабочими местами. Владимир Федорович – настоящий государственный деятель, мыслящий категориями развития родного края. Возглавляя Ассоциацию земледельцев Новосибирской области, он уделяет огромное внимание сохранению исторической памяти, поддержке ветеранов и воспитанию молодежи.

² Открытый доступ, URL: <https://rating.gd.ru/profile/khritankov-vladimir-fedorovich/> (дата обращения 20.10.2025)



*«Бухта Лазурная»: перспективы развития внутреннего туризма очевидны.
Фото Павла Комарова предоставлено ассоциацией землячеств Новосибирской области*



Огромная производственная, научно-педагогическая, общественная деятельность и личный вклад Владимира Фёдоровича в развитие сибирского края отмечены высшими государственными и

отраслевыми наградами: Заслуженный строитель РФ, Почетный гражданин Новосибирской области, Орден Дружбы, медаль ордена «За заслуги перед Отечеством» II степени, почётный знак Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства России, серебряная медаль «За вклад в развитие агропромышленного комплекса России», знак отличия «За милосердие и благотворительность», памятная медаль «Патриот России»³.

Желаем Вам, уважаемый Владимир Федорович, крепкого сибирского здоровья, семейного благополучия, творческих успехов в научной и педагогической деятельности, продолжения присущей Вам активной производственной деятельности и долголетия.

*Редакционный совет, редакционная коллегия,
сетевого научно-практического издания
«Эксперт: Теория и практика»*

³Открытый доступ, URL:https://vk.com/wall-90246160_9783_<https://famous-scientists.ru/>

[dissertation/2505, https://www.nsk.kp.ru/online/news/4087370/](https://www.nsk.kp.ru/online/news/4087370/) (дата обращения 20.10.2025)



**ОДА ХРИТАНКОВУ ВЛАДИМИРУ ФЕДОРОВИЧУ
в честь семидесятипятилетия**

Оптимисты рождаются не часто –
Счесть по пальцам руки можно всех,
Кто поверил в мечту или сказку
И кого ждёт по жизни успех...

Вот и ты – ЮБИЛЯР многогласный
Отнесён к Высшей касте сполна:
Строишь планы смелей и прекрасней,
Чем любая другая страна...

Ты на «Бухте Лазурной» порядок
Смог привить всем, чтоб, бухту любя,
Отдыхали не просто бродяги,
А достойные люди - друзья!

Конференции ярко проводишь –
Ведь по стройке ты дока большой!
С медициною дружбу ты водишь,
Окунувшись в неё с головой...

Ты Землячества лигу возглавил,
Что когда-то создал Гаращук -
Он уверенно делом тем правил
И тебе передал лучший друг...

Ты же вносишь свои аргументы:
Методично, порой не спеша;
Ищешь лучшие в жизни моменты,
Чтоб зажглась в молодёжи душа...

И тебе есть до каждого дело:
То цветник, то какой-то чертог,
То зверей приручил так умело,
Что отстроил им здания впрок...

То возникла идея с бассейном
И шикарный сваял аквапарк
И не только один, а «рассеял»
Тот проект, чтоб на «Бухте» он встал...

Ты в Медведке родился давненько,
Хоть села уж того больше нет..
Каждый год место той деревеньки
Посещаешь - вкусить «дивный свет»!...

Этот свет от родимой землицы
Душу лечит и силы даёт!
И поэтому вновь до зарницы
Твоё сердце стучит и поёт!

И рождаются новые планы,
И блещут от задумок глаза,
И готов ты летать, как орланы;
И готов вновь дерзать без конца!

Будь же счастлив в чудесном твореньи!
Коль высоты наметил – бери!
Плодотворная жизнь лишь в движении
Продолжай, так же смело твори!

А друзья тебе точно помогут:
Кто советом, кто дело свершит..
Мы все рады – в Сибирских чертогах
Друг живёт и так классно творит!



А ещё будь здоров непременно
И семья чтоб любила тебя,
И по-прежнему также отменно
Путешествуй, Отчизну любя!



03.10.2025

Пичугины Анатолий Петрович
и Татьяна Николаевна

CONGRATULATIONS TO HRITANKOV V.F. ON THE 75th BIRTHDAY

Congratulations on the 75th birthday to the member of the editorial panel of the online scientific-practical publication "Expert: Theory and Practice," Professor, Doctor of Technical Sciences, Honored Builder of the Russian Federation, and Honorary Citizen of Novosibirsk region, Hritankov Vladimir Fedorovich. He is a legendary figure who is in charge of the "Karachinsky spring," the "Lake Karachi" sanatorium, and the Svetlogorsk plant that makes structures and products out of reinforced concrete.

Dear Vladimir Fedorovich, we wish you strong Siberian health, family well-being, creative success in scientific and pedagogical activity, continuation of active production activities, and longevity.

*The editorial board and editorial panel
of the online scientific and practical publication
"Expert: TheoryandPractice"*

Репринт

УДК 69.07

ГРНТИ: 67.11.41: Комбинированные конструкции

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

doi:10.51608/26867818_2025_4_16

РАСЧЁТ СТАЛЕЖЕЛЕЗОБЕТОННОГО ПЕРЕКРЫТИЯ БИЗОН ППУ-260 ПРИ ВАРИАЦИИ ТОЛЩИН НАСТИЛА И ПРОЛЁТОВ В СООТВЕТСТВИИ С СП260.1325800.2016¹

© Авторы 2025

SPIN: 1041-9513

АНПИЛОВ Сергей Михайлович

Заслуженный изобретатель РФ, Почетный строитель РФ,
советник РААСН, д.т.н., профессор кафедры ЖБК
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет «Сибстрин»*
(Россия, Новосибирск, e-mail: anpilovsm@yandex.ru)

SPIN: 9371-7653

УМНОВА Ольга Владимировна

кандидат технических наук, доцент кафедры
«Конструкции зданий и сооружений»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: pf166@yandex.ru)

МАРКИН Игорь Анатольевич

аспирант
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: igormarkin09@gmail.com)

Аннотация. Статья посвящена теоретическим исследованиям, сравнительному анализу сталежелезобетонных конструкций перекрытий, выполненных с несъемной опалубкой из настила армирующего, торговой марки «БИЗОН» 260h x 600 из тонколистового оцинкованного проката (класс покрытия—275 г/м²), толщиной от 0,8 до 1,6 мм, марки 350. Производимого по ТУ-1120-003-316631300162970-2019 из конструкционной углеродистой стали марки Ст1-3 в соответствии с ГОСТ 19904-90, ГОСТ 14918-80, ГОСТ Р 52146-2003, ГОСТ Р 52246-2016.

Ключевые слова: строительные материалы; сталежелезобетонные конструкции; настил армирующий «БИЗОН»; профиль стальной; ЛСТК; оцинкованный прокат

Для цитирования: Анпилов С.М., Умнова О.В., Маркин И.А. Расчёт сталежелезобетонного перекрытия БИЗОН ППУ-260 при вариации толщин настила и пролётов в соответствии с СП260.1325800.2016 // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 16-27. doi:10.51608/26867818_2025_4_16.

¹ Статья выпускается повторно. Первое издание: Анпилов, С. М. Расчет сталежелезобетонного перекрытия бизон ППУ-260 при вариации толщин настила и пролетов в соответствии с СП260. 1325800. 2016 / С. М. Анпилов, О. В. Умнова, И. А. Маркин // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт : материалы XI Международной научно-практической конференции. Направление конференции «Вызовы, стратегии и решения комплексного развития территорий», Тамбов, 28–29 мая 2025 года. – Тамбов: Тамбовский государственный технический университет, 2025. – С. 171-182. – EDN HBSGTQ.



Reprint

CALCULATION OF THE STEEL-REINFORCED BEAMS BISON PPU-260 WITH VARIATIONS IN THICKNESS
AND SPANS ACCORDING TO SP260.1325800.2016²

© The Author(s) 2025

ANPILOV Sergey Mikhailovich

doctor of technical sciences, professor of the Department
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering
(Sibstrin) (Russia, Novosibirsk)

UMNOVA Olga Vladimirovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)

MARKIN Igor Anatolyevich

PhD Candidate
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov)

Abstract. The article is devoted to theoretical studies and comparative analysis of steel-reinforced concrete structures of slabs made with fixed formwork from reinforced plate "BISON," which is 260h × 600 from thin-sheet galvanized steel (class of coating-275 g/m²), thickness from 0.8 to 1.6 mm, 350 mark. Manufactured by TU-1120-003-316631300162970-2019 from structural carbon steel mark St1-3 according to GOST 19904-90, GOST 14918-80, GOST P 52146-2003, and GOST P 52246-2016.

Keywords: building materials; steel-reinforced concrete structures; reinforced plate "BISON"; steel side surface; light steel thin-walled structures; galvanized steel

For citation: Anpilov S.M., Umnova O.V., Markin I.A. Calculation of the steel-reinforced beams BISON PPU-260 with variations in thickness and spans according to SP260.1325800.2016 // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 16-27. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_16.

Введение. Практическая реализация государственных программ развития России, требует от строительной отрасли комплексного научного подхода к созданию комфортной среды для граждан России, проживающих во всех населенных пунктах страны. Экономика страны способна обеспечить высокий уровень жизни населения благодаря научным знаниям, основанным на результатах научных исследований, носящих фундаментальный характер – на острие прогресса, которые востребованы и внедрены в реальный сектор экономики.

Научные знания, которые обеспечивают:

- сокращение трудозатрат и сроков возведения объектов;
- снижение себестоимости строительной продукции;
- параллельное ведение строительных процессов проектирования, изготовления и монтажа

строительных конструкций с применением поточного метода возведения объектов;

- многофункциональность выполнения строительного-монтажных работ на объекте в любом сезоне года и др.

Создание новых конструктивных решений перекрытий, например, безбалочного перекрытия с использованием профилированного настила в качестве внешнего армирования позволяет отказаться от стальных балок в качестве опор, что снижает металлоёмкость каркаса.

По результатам исследования нормативно-правовых актов, патентов РФ и проведенного теоретического исследования авторами установлена перспективность внедрения сталежелезобетонных строительных конструкций перекрытий и покрытий с несъемной опалубкой из НА «БИЗОН» на объектах капитального строительства страны [1-17].

² The article is being republished. First edition: Anpilov, S. M. Calculation of the steel-reinforced concrete floor of bison PPU-260 with variations in the thickness of the flooring and spans in accordance with SP260. 1325800. 2016 / S. M. Anpilov, O. V. Umnova, I. A. Markin // Sustainable development of the region: architecture, construction, transport : proceedings of the XI International Scientific and Practical Conference. The direction of the conference "Challenges, strategies and solutions for the integrated development of territories", Tambov, May 28-29, 2025. – Tambov: Tambov State Technical University, 2025. – Pp. 171-182. – EDN HBSGTQ.



На примере теоретических исследований НА «БИЗОН» высокой заводской готовности, авторами установлено, что достигнуть поставленной цели по реализации государственных программ развития страны, возможно за счет применения быстровозводимых строительных систем для сталежелезобетонных конструкций с внешней арматурой, которая повышает несущую способность конструкции плиты, уменьшает её собственный вес, а следовательно, обеспечивает экономию строительных материалов и сокращает трудозатраты на возведение объекта.

В данной статье приведены результаты теоретических исследований, выполненных с использованием Microsoft Office Excel сталежелезобетонного перекрытия и несъемной опалубки из настила армирующего НА «БИЗОН» [1] 260h x 600L из тонколистового оцинкованного проката (класс покрытия – 275 г/м²), толщиной от 0,8 до 1,6 мм, марки 350. Настил производится по ТУ-1120-003-316631300162970-2019 из конструкционной углеродистой стали марки Ст.1-3 в соответствии с ГОСТ 19904-90, ГОСТ 14918-80, ГОСТ Р 52146-2003, ГОСТ Р 52246-2016 [2]. Поперечное сечение профиля несъемной опалубки из настила показано на рисунке 1.

Методология. Перекрытие рассчитывалось в соответствии указаний норм [1-9] на нагрузки, установленные для общественных зданий.

В настоящей работе применены термины и определения по ГОСТ 34329 [3] и приняты следующие сокращения:

Пролет – расстояния между осями опор, на которые опирается сталежелезобетонная плита перекрытия СЖБП.

– НА «БИЗОН» – соединенные между собой стальные профилированные профили 260h x 600L настила армирующего, выполняющие функции несъемной опалубки и дополнительно внешней рабочей арматуры для СЖБП.

Модуль упругости для стали в расчетах принят: Е-200000 МПа или 2 039 400 кг/см².

Характеристики материалов СЖБП: класс бетона - В25, класс арматуры - А500 и В500. Технические характеристики редуцированного сечения НА «БИЗОН» приняты по таблицам 1 и 2.

СЖБП выполнено из монолитной железобетонной плиты, бетонируемой по НА «БИЗОН», который после набора бетоном распалубочной прочности и выполнения мероприятий по обеспечению

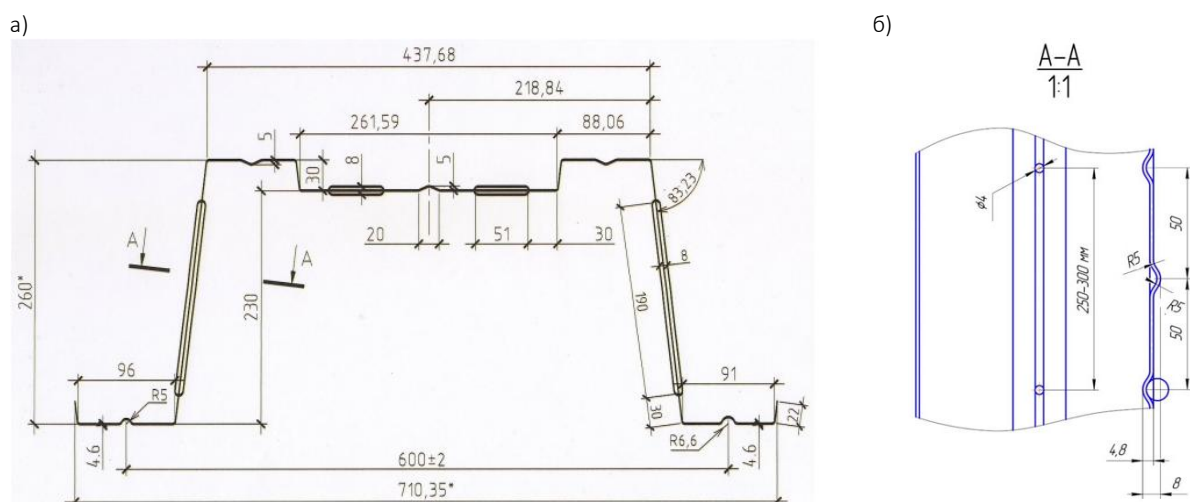


Рисунок 1 – НА «БИЗОН»: а) – Поперечное сечение профиля НА «БИЗОН» [1]; б) – Сечение А-А профиля НА «БИЗОН», вертикальные рифы (выштамповки) профиля

Задача. В данных исследованиях поставлена задача по определению наиболее эффективных областей применения настила армирующего, при различных пролетах: от 3,0 до 12,0 м и при разных толщинах армирующего настила: от 0,8 до 1,6 мм на стадиях выполнения бетонных работ и на стадии эксплуатации объекта. По результатам теоретических исследований подготовить предложения и рекомендации по эффективному внедрению НА «БИЗОН» и дальнейших направлений научных исследований несъемной опалубки для внедрения в реальный сектор экономики.

огнестойкости СЖБП, может использоваться в качестве внешней арматуры плиты перекрытия [15-17].

Таблица 1 – Характеристики арматуры и бетона

Наименование материала	Характеристика, обозначение	Значение, МПа
Бетон В25	Расчётное сопротивление сжатию, R_b	14,5
Бетон В25	Модуль упругости, E_b	30000
Арматура А500	Расчётное сопротивление растяжению, R_s	435
Арматура А500	Расчётное сопротивление сжатию при продолжительном действии нагрузки, R_{sc}	435



Наименование материала	Характеристика, обозначение	Значение, МПа
Арматура А500	Расчётное сопротивление сжатию при непродолжительном действии нагрузки, R_{sc}	400
Арматура В500	Расчётное сопротивление сжатию при продолжительном действии нагрузки, R_{sc}	415
Арматура В500	Расчётное сопротивление сжатию при непродолжительном действии нагрузки, R_{sc}	380

Таблица 2 – Характеристики профиля
НА «БИЗОН» 260-600

Технические характеристики	Ед. изм.	НА «БИЗОН» 260-600					
Толщина, t	мм	0,8	1,0	1,2	1,5	1,6	
Класс стали		350					
Покрытие	г/м²	Zn не менее 275					
Предел текучести, f_y	МПа	Не менее 350					
Временное сопротивление разрыву, f_u	МПа	Не менее 420					
Высота h	мм	260					
Отгиб l	мм	21					
Ширина заготовки	мм	1250					
Площадь	мм²	627	875	1160	1631	1820	
Масса	кг	7,722	9,684	11,645	14,590	15,563	
Момент инерции сечения J_x	см⁴	655,23	947,56	1237,02	1539,76	1680,08	
Момент инерции сечения J_y	см⁴	2942,88	4291,56	5600,02	7074,23	7545,84	
Радиус инерции i_x	см	2,90	2,89	2,87	2,87	2,87	
Радиус инерции i_y	см	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14	
Момент сопротивления W_{x1}	см³	41,92	60,56	79,04	99,80	107,48	
Момент сопротивления W_{x2}	см³	63,30	91,56	119,52	148,77	163,91	
Момент сопротивления W_{y1}	см³	82,67	120,56	157,39	198,72	211,96	
Zo (расстояние от низа профиля до центра тяжести сечения)	см	10,35	10,35	10,35	10,35	10,35	

На этапе бетонирования СЖБП рассчитано в соответствии с требованиями норм [3-9] на действие постоянных, временных длительных и кратковре-

менных нагрузок для помещений общественных зданий (таблица 3), в т.ч.:

– нормативные значения равномерно распределенных нагрузок P_t приняты по п.2, табл. 8.3 [4] – 2,0 кПа;

Таблица 3 – Сбор нагрузок на перекрытие

Наименование нагрузки	Нормативное значение нагрузки, кПа	Коэффициент надёжности по нагрузке	Расчётное значение нагрузки
Постоянная			
Керамогранитная плитка, 10 мм	0,18	1,3	0,234
Стяжка 40 мм	0,72	1,3	0,936
Звукоизоляция 20 мм	0,02	1,3	0,026
Стяжка 40 мм	0,72	1,3	0,936
Итого по постоянным	1,64		2,13
Длительные			
Временные перегородки, 0,5 кПа	0,5	1,3	0,65
Временная нагрузка на перекрытие 2 кПа, уменьшенное нормативное значение с коэффициентом 0,35	0,7	-	-
Сосредоточенная нагрузка	1,5 кН	1,2	1,8
Кратковременные			
Временная нагрузка на перекрытие 2 кПа с полным значением	2	1,2	2,4
Итого по кратковременным	2	-	2,4

– коэффициент надёжности по нагрузке γ_f для равномерно распределенных нагрузок, принят $\gamma_f = 1,2$ по п.8.2.7 [4];

– нормативные значения сосредоточенных нагрузок Q_t для перекрытий - 1,5 кН по пп. а), п.8.3.4 [4];

– вертикальные предельные прогибы f_u для СЖБП приняты по [9] п.2г, табл.Д.1: для пролета 6м L/200; для пролета до 12 м L/250.

– прогиб формообразующей поверхности несущей поверхности НА «БИЗОН» принят L/400 п.5.4.2 [9];

– собственная масса НА «БИЗОН» по табл. 2;

– коэффициент надёжности по нагрузке для НА «БИЗОН» принят $\gamma_f = 1,05$ по п.2 табл. 7.1[4];

– масса «мокрого бетона» 2500 кг/м³; по п.7.22 [9];



– масса дополнительной стержневой арматуры принята из расчета 100 кг/м^3 [9];

– дополнительные динамические нагрузки, возникающие при укладке бетонной смеси бетононасосами, приняты 500 кгс/м^2 по табл. 6.1 [8];

– коэффициенты надежности приняты для собственного веса опалубки $K_1 = 1,1$;

– коэффициенты надежности приняты для собственного веса бетонной смеси и арматуры $K_2 = 1,2$;

– коэффициенты надежности приняты от динамической нагрузки при выгрузке бетонной смеси $K_3 = 1,3$ по табл. 7.2 [9];

Расчет НА «БИЗОН» выполнялся для двух стадий жизненного цикла СЖБП:

– стадия бетонирования монолитного перекрытия;

– стадия эксплуатация объекта капитального строительства.

Рассматриваемое СЖБП имеет один пролёт и шарнирное закрепление. При расчёте производилось варьирование пролёта от 3,0 до 12,0 м и толщины листа настила армирующего, от 0,8 до 1,6 мм.

Расчёт на стадии бетонирования включает в себя следующие этапы в соответствии с п.10 [9]:

– по прочности (изгибающий момент);

– по жесткости на допустимый прогиб.

Сначала выполнялся расчёт прогиба и определялась необходимость установки промежуточных опор, а также выполнялось уточнение значения нагрузки, которая увеличивается при увеличении

прогиба. Далее проверялась несущая способность на действие изгибающего момента и поперечной силы, производилось вычисление прогиба.

Расчет на стадии бетонирования ведётся для листа в середине пролёта по нормальным сечениям по формуле (1) по СП 266.1325800.2016 [8].

$$\frac{M}{W_{min}} \leq R_y. \quad (1)$$

Расчёт устойчивости стенок гофров производится по формуле (2) по [8]

$$Q \geq 0,5k_1q_p l S_n \gamma_{M1}, \quad (2)$$

Критическая сила потери местной устойчивости стенки гофры определяется по формуле (3) по [8]:

$$Q = \alpha t_n^2 \sqrt{R_{yn} E_{st}} \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{r_n}{t_n}} \right) * \left(0,5 + \sqrt{\frac{0,02 l_a}{t_n}} \right) \left(2,4 + \left(\frac{\theta}{90} \right)^2 \right). \quad (3)$$

Расчёт прогиба выполняется по формуле (4) по [8]

$$f_n = k_2 \frac{q_n l^4}{E_{st} I_{n,x}}. \quad (4)$$

Далее в статье рассматривается расчёт сталежелезобетонного перекрытия, выполненного по профилю «БИЗОН» ППУ-260 в соответствии с СП 266.1325800.2016 [8] на стадиях бетонирования и эксплуатации. Поперечное сечение профиля показано на рисунке 1 [1]. На рисунках 2-13 приведены результаты расчетов настила на стадии бетонирования

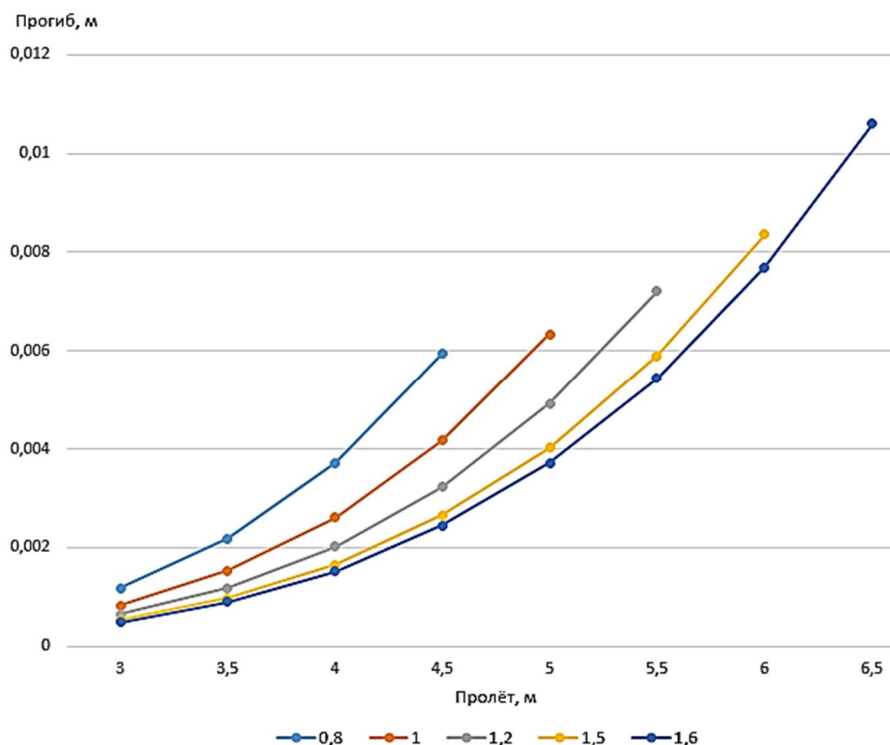


Рисунок 2 – Зависимость прогиба (м) от пролёта на стадии бетонирования без временных опор

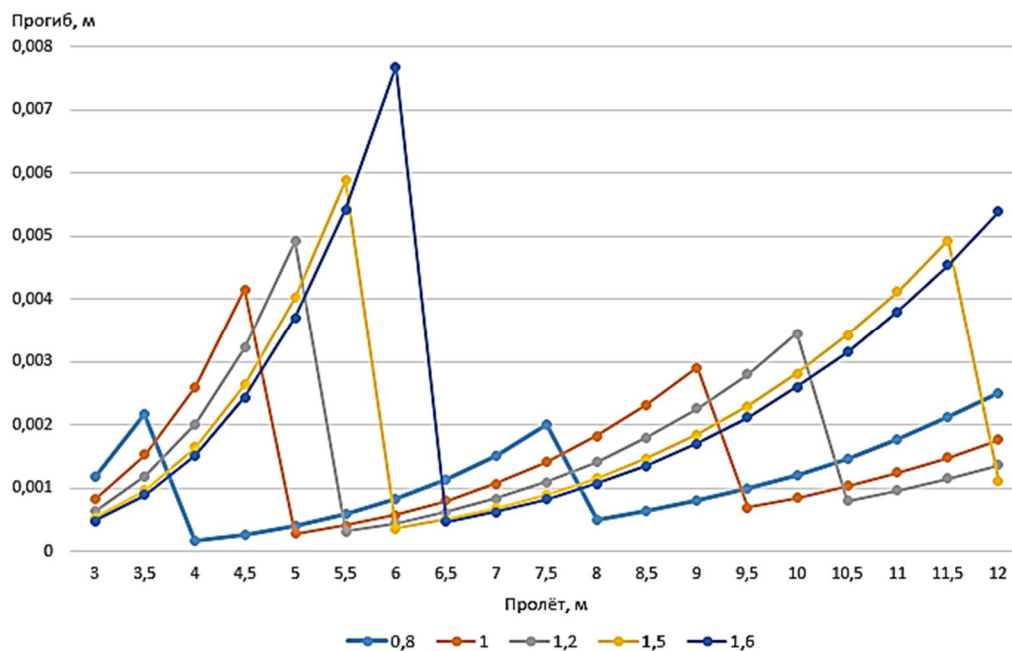


Рисунок 3 – Зависимость прогиба от пролёта (м) на стадии бетонирования с временными опорами

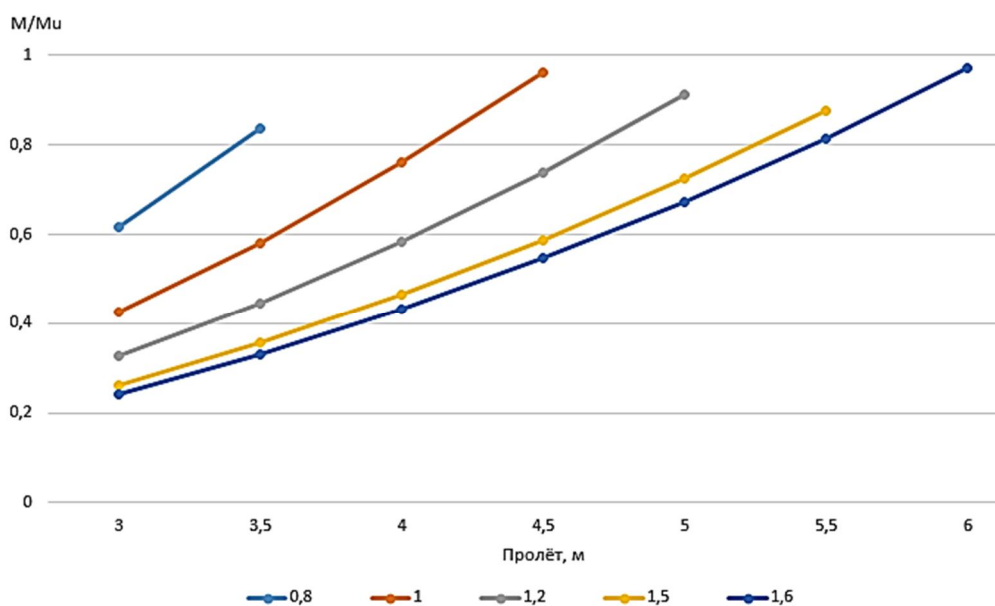


Рисунок 4 – Зависимость M/M_u от пролёта на стадии бетонирования без временных опор

ния и эксплуатации без временных опор и с их наличием при вариации толщин и пролетов.

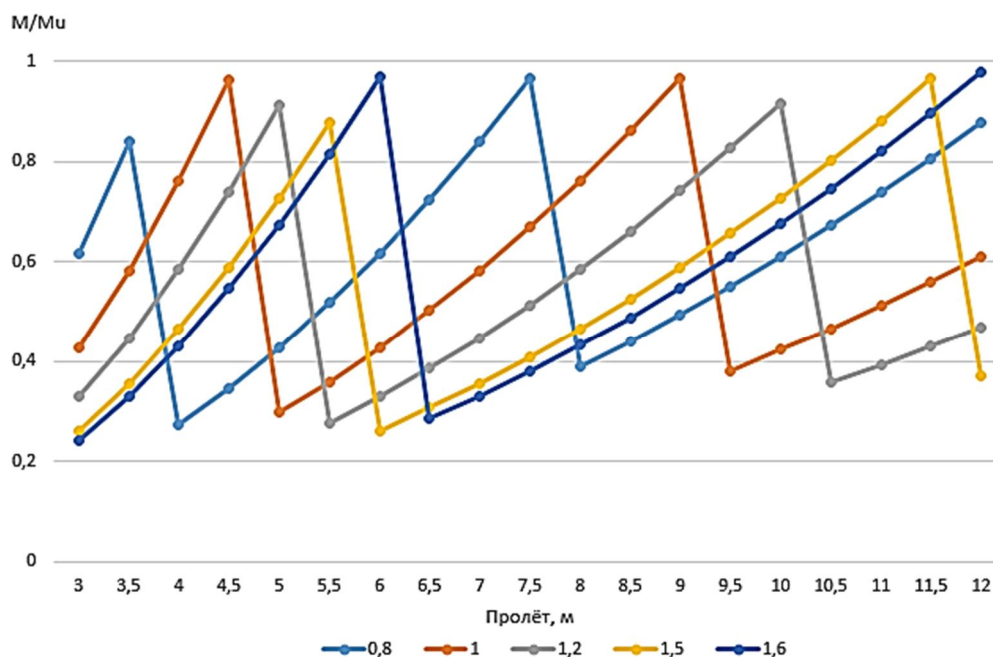
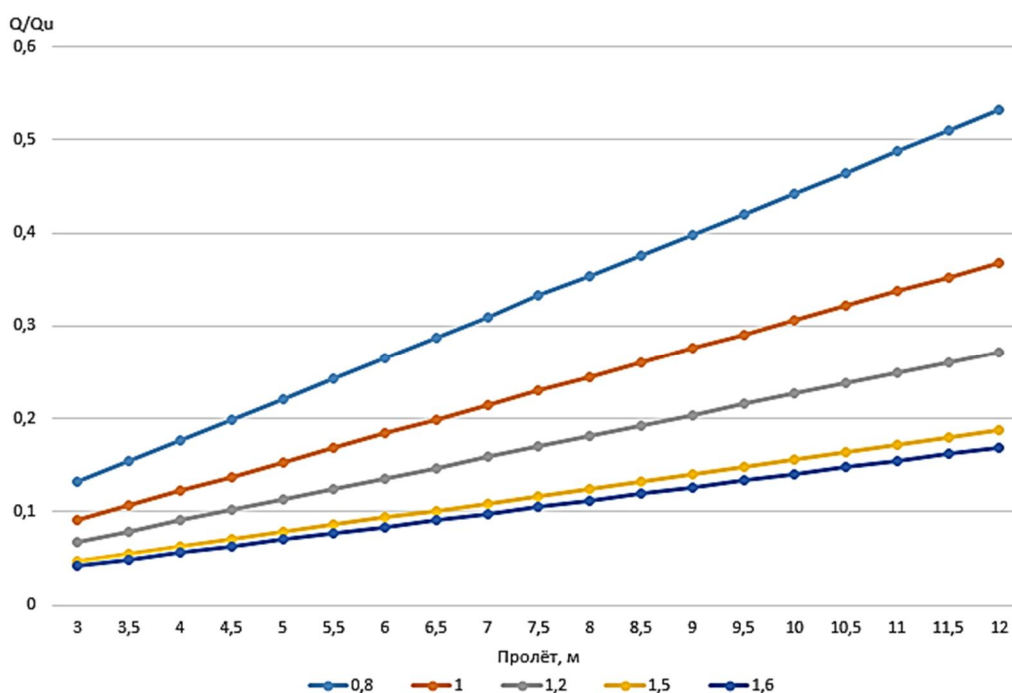
Расчет на стадии бетонирования. По результатам расчета прогибов настилов на стадии бетонирования без использования временных опор построены зависимости прогиба от пролета (рисунок 2).

Анализируя зависимости, можно сделать вывод о возможности применения данного типа настила без применения временных промежуточных опор при пролётах 3,5...6 м.

При постановки промежуточных опор максимальный пролёт, для которого возможно применение настила определённого типоразмера можно увели-

чить. Зависимости, иллюстрирующие данное утверждение, показаны на рисунке 3. Абсцисса начала нисходящего участка зависимости соответствует наибольшему пролёту при данной толщине настила без промежуточных опор. Дальнейшее увеличение пролёта, требует установки промежуточной опоры, в этом случае возможно увеличение пролета настила от 4 до 12 м в зависимости от толщины армирующего профлиста.

На рисунках 4 и 5 показаны графики зависимостей отношения изгибающего момента в середине пролёта к несущей способности по изгибающему моменту от величины пролёта без временных опор и с их наличием.

Рисунок 5 – Зависимость M/M_u от пролёта на стадии бетонирования с временными опорамиРисунок 6 – Зависимость Q/Q_u от пролёта на стадии бетонирования без временных опор

На рисунках 6 и 7 приведены графики зависимостей отношения поперечной силы к предельной поперечной силе (Q/Q_u), при которой происходит потеря устойчивости стенки, от величины пролёта без временных опор и с применением временных опор. Зависимости получены без учета вертикальных рифов (выштамповки) на боковой поверхности стенки армирующего профиля (рис. 1). Несомненно, вертикальные рифы способствует увеличению устойчивости стенки и фактические значения приводимого от-

ношения Q/Q_u будут меньше, что позволит использовать меньшее количество промежуточных опор.

Расчёт на стадии эксплуатации. Расчёт по нормальным сечениям в соответствии с [8] выполняется по трем возможным случаям: граница сжатой зоны бетона проходит выше верхней полки настила, граница сжатой зоны бетона совпадает с верхней полки настила, граница сжатой зоны бетона проходит ниже верхней полки настила и выше дна выемки в верхней полке.

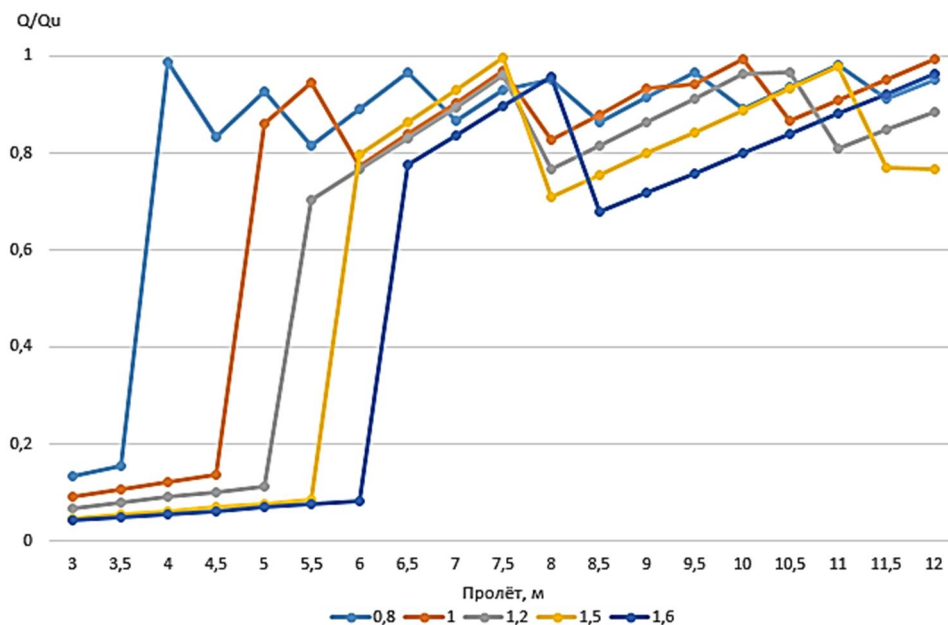


Рисунок 7 – Зависимость Q/Q_u от пролёта на стадии бетонирования с временными опорами

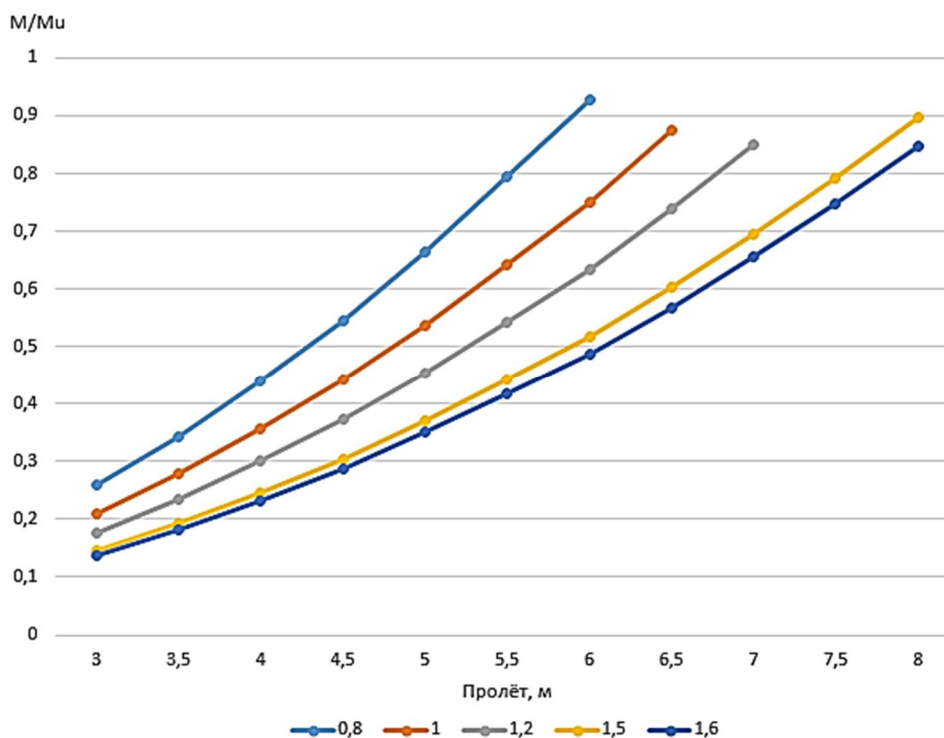


Рисунок 8 – Зависимость M/M_u от пролёта на стадии эксплуатации

В случае расчёта перекрытия с профилем «БИ-ЗОН» ППУ-260, который имеет выемку в верхней части полки необходимы 2-а дополнительных случая расчёта: граница сжатой зоны бетона совпадает с дном выемки в верхней полке настила, граница сжатой зоны бетона проходит ниже дна выемки в верхней полке настила. В нашем случае возникали только расчётные случаи в соответствии с [8], что может быть объяснено определённым соотношением прочностных характеристик используемых материалов.

Высота сжатой зоны бетона определялась из условия (5):

$$R_b A_b + R_{sc} A'_s + \gamma_c R_y A_{n1} = R_s A_s + \gamma_c R_y A_{n2}, \quad (5)$$

где A_b – площадь сечения сжатой части бетона; A'_s – площадь сечения сжатой арматуры; A_s – площадь сечения растянутой арматуры; A_{n1} – площадь сечения сжатой части настила; A_{n2} – площадь сечения растянутой части настила; R_y – расчётное сопротивление стали.

Предельный изгибающий момент M_u определялся как момент, равный сумме произведений ста-



тических моментов элементов сечения относительно центра тяжести сечения растянутой арматуры на расчётное сопротивление соответствующих элементов.

Расчёт прогиба выполняется по формуле (6)

$$f_m = f_n + f_{rc} + f_{add}, \quad (6)$$

На рисунке 8 представлены графики зависимостей отношения изгибающего момента в середине пролёта к несущей способности по изгибающему моменту (M/M_u) без использования дополнительной арматуры в растянутой зоне.

Анализируя рисунки 6-8, можно сделать вывод: при увеличении толщины профиля повышается предельная величина пролёта без дополнительного армирования в растянутой зоне; без увеличения толщины профиля увеличение предельной величины пролёта возможно при установке дополнительной арматуры в растянутой зоне.

На рисунке 9 показаны графики зависимостей требуемой площади арматуры в растянутой зоне от пролёта настила и его толщины при выполнении условий первой группы предельных состояний. Изломы за-

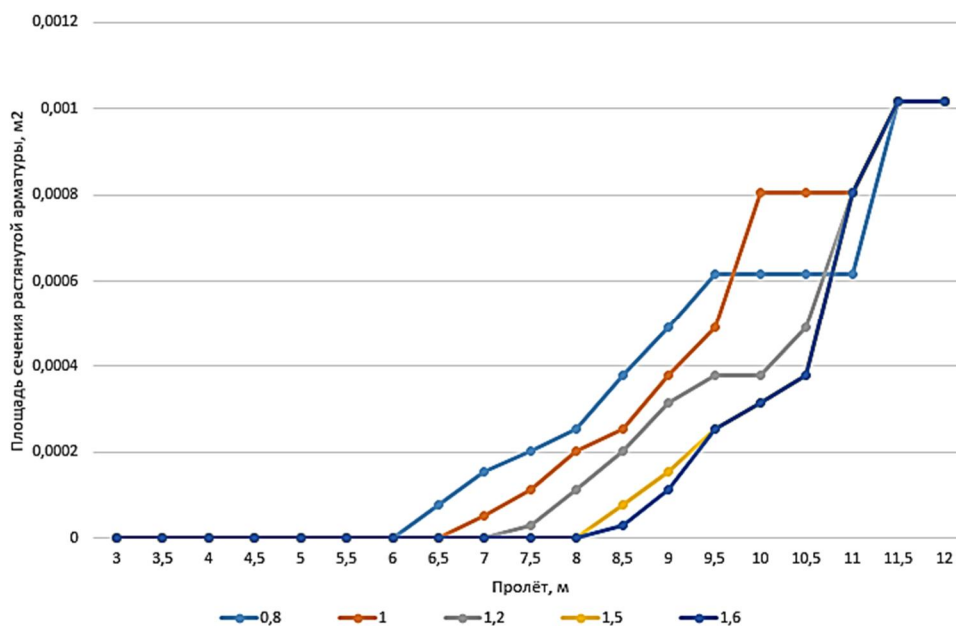


Рисунок 9 – Зависимость требуемой площади арматуры в растянутой зоне м² от пролёта

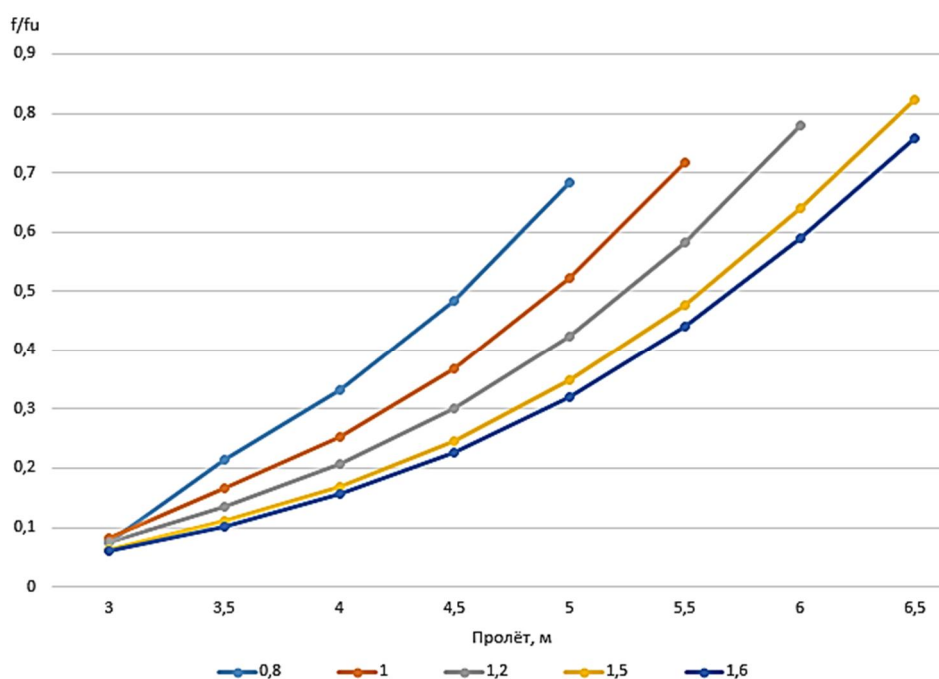


Рисунок 10 – Зависимость f/f_u от пролёта на стадии эксплуатации без применения временных опор на стадии бетонирования



висимостей можно объяснить изменением диаметра арматуры в растянутой зоне при увеличении пролёта.

перекрытия на 0,5...1 м при использовании временных опор при бетонировании.

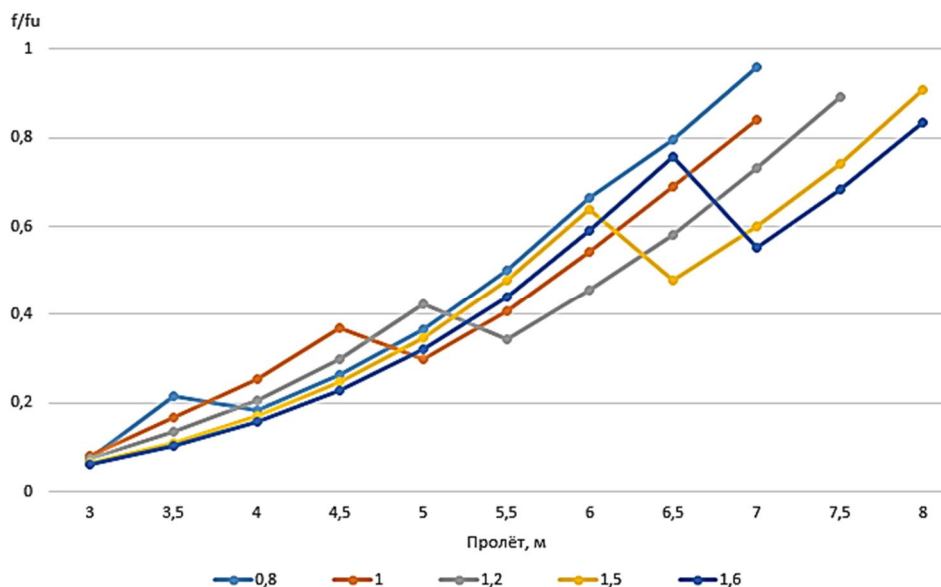


Рисунок 11 – Зависимость f/f_u от пролёта на стадии эксплуатации с временными опорами на стадии бетонирования

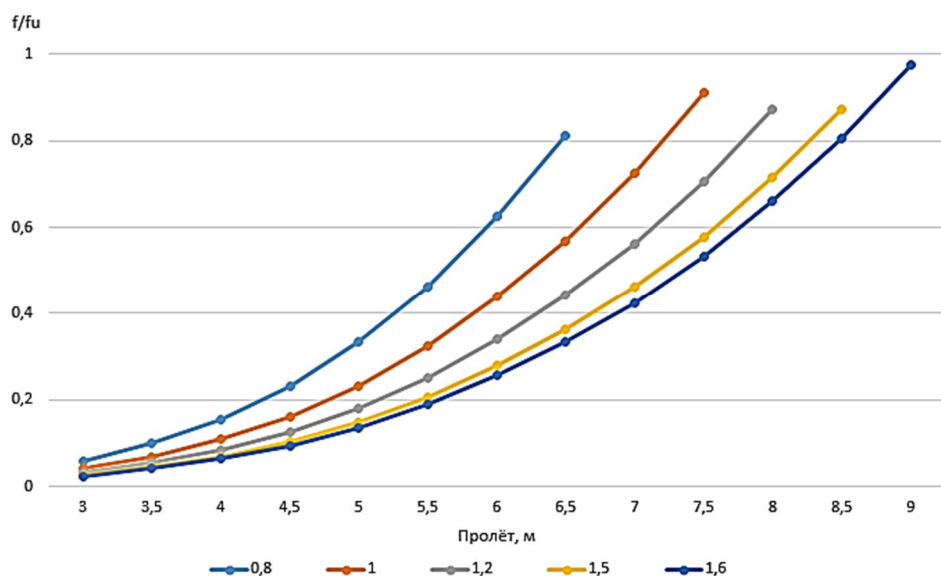


Рисунок 12 – Зависимость f/f_u от пролёта на стадии эксплуатации без временных опор на стадии бетонирования с перераспределением изгибающих моментов на опорах

На рисунках 10 и 11 представлены графики зависимостей отношения прогиба с тележелезобетонной плиты перекрытия от эксплуатационной нагрузки с учетом прогиба при бетонировании к предельному прогибу (f/f_u) без временных опор и с их применением соответственно. По графикам можно сделать вывод о возможности увеличения пролёта

На рисунках 12-13 показаны графики отношения прогиба в середине пролёта без временных опор и с использованием временных опор при бетонировании, соответственно, к предельному прогибу (f/f_u) с перераспределением изгибающего момента. По рисунку 13 можно сделать вывод о возможности применения НА «БИЗОН» при пролёте, практически равному 12 м.

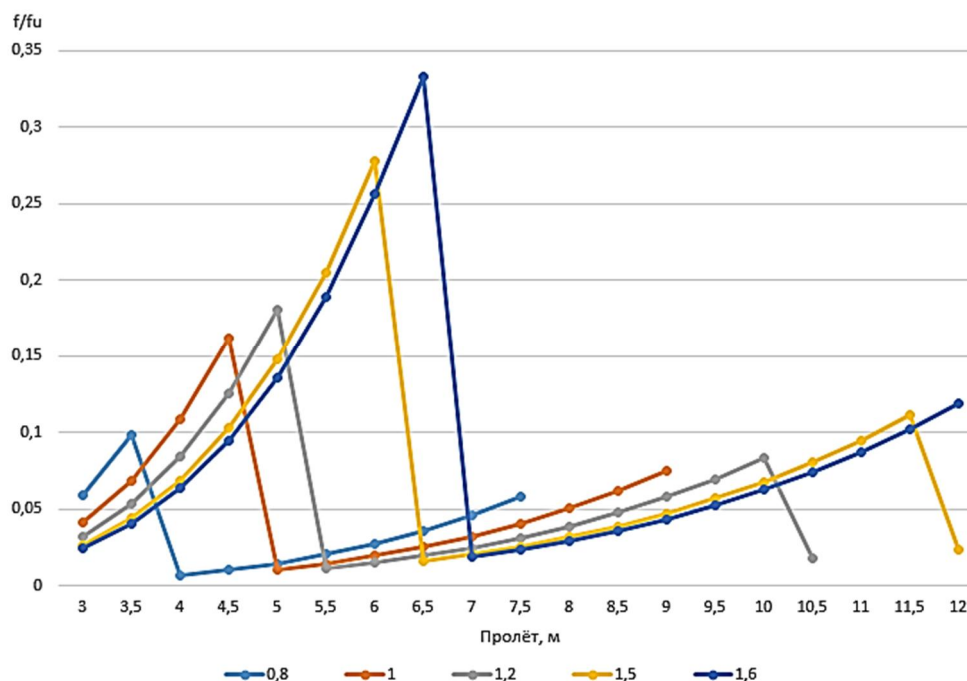


Рисунок 13 – Зависимость f/f_u от пролёта на стадии эксплуатации с временными опорами на стадии бетонирования с перераспределением изгибающих моментов на опорах

Выводы:

1. НА «БИЗОН» из стали С350 в качестве несъемной опалубки можно использовать при пролётах без применения временных опор, соответственно 4,5 м при толщине 0,8 мм и 6 м при толщине профиля 1,6 мм. При этом предельным состоянием является превышение прогибов больше предельных значений;

2. Применение временных опор позволяет расширить применение профиля в качестве несъемной опалубки до 12 м. Однако, при этом наблюдается некоторое снижение местной устойчивости стенки профиля без учета вертикальных рифов.

3. На стадии эксплуатации диапазон пролётов, при которых возможно применение данного профиля составляет 5...6,5 м без временных опор при бетонировании и 7...8 м с применением временных опор при бетонировании. Однако, следует отметить, что данные значения получены для однопролётной схемы перекрытия. В действительности при шарнирном опирании перекрытия в соответствии с п. 6.1.2.1 [8] при расчёте на опорах следует прикладывать в качестве внешней нагрузки изгибающий момент, равный несущей способности профиля на изгиб. На рисунках 12-13 показаны графики зависимостей с учётом данного изгибающего момента. В этом случае появляется возможность применения НА «БИЗОН» при пролёте, практически равному 12 м.

4. Выявлены достоинства СЖБП:

- значительное сокращение трудозатрат на строительной площадке за счёт высокой скорости

выполнения строительно-монтажных работ по установке опалубки без временных опор и с ними для стадии бетонирования;

- высокая несущая способность СЖБП при обеспечении совместной работы железобетона и несъемной опалубки, как дополнительной жесткой арматуры.

Библиографический список

1. ТУ-1120-003-316631300162970-2019 Профили стальные листовые гнутые с трапециевидными гофрами для сталежелезобетонных конструкций (Настилы армирующие – НА «БИЗОН»). Дата введения: 20 августа 2019 г., Тольятти.
2. ГОСТ 52246-2016 Прокат листовой горячеоцинкованной. Технические условия. Федеральное агентство по техническому регулированию. Москва, 2016.
3. ГОСТ 34329-2017 Опалубка. Общие технические условия. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации (МГС). Москва, 2018.
4. СП 20.13330.2016 Нагрузки и воздействия (ред. от 30.12.2020).
5. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Минстрой РФ, Москва 2018.
6. Методическое пособие к СП 63.13330. Расчет железобетонных конструкций без предварительного напряженной арматуры. Минстрой РФ, Москва, 2015.
7. СП 260.1325800.2016 Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования. Минстрой РФ, Москва, 2016.
8. СП 266.1325800.2016 Конструкции сталежелезобетонные. Правила проектирования. Минстрой РФ, Москва, 2016.



9. СП 371.1325800.2017 Опалубка. Правила проектирования. Минстрой РФ, Москва, 2017

10. Патент на полезную модель № 147448 U1 Российская Федерация, МПК E04G 9/00. Опалубочный элемент : № 2014106458/03 : заявл. 20.02.2014 : опубл. 10.11.2014 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN QFXCFG.

11. Патент на промышленный образец № 92911 Российская Федерация. Опалубочный элемент : № 2014500646 : заявл. 20.02.2014 : опубл. 16.04.2015 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN FOUAII.

12. Патент № 2552506 C1 Российская Федерация, МПК E04B 2/86. Способ возведения монолитных конструкций зданий и несъемная универсальная модульная опалубочная система : № 2014105016/03 : заявл. 11.02.2014 : опубл. 10.06.2015 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN FNUUAY.

13. Патент № 2561127 C1 Российская Федерация, МПК E04G 11/40, E04B 5/40. Несъемная опалубка монолитного перекрытия : № 2014111706/03 : заявл. 26.03.2014 : опубл. 20.08.2015 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. С. Анпилов [и др.]. – EDN ZFJZED.

14. Патент на полезную модель № 147448 U1 Российская Федерация, МПК E04G 9/00. Опалубочный элемент : № 2014106458/03 : заявл. 20.02.2014 : опубл. 10.11.2014 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN QFXCFG.

15. Патент № 2795798 C1 Российская Федерация, МПК G01N 25/50. Способ определения огнестойкости монолитной сталежелезобетонной плиты перекрытия здания : № 2022118246 : заявл. 04.07.2022 : опубл. 11.05.2023 / С. М. Анпилов, Н. А. Ильин, О. Б. Керженцев [и др.].

16. Способы продления жизненного цикла зданий с деревянными перекрытиями / Ю. Л. Сколубович, С. М. Анпилов, Д. А. Добровольский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 9(789). – С. 88-103. – DOI 10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103. – EDN JDYWRB.

17. Патент № 2820548 C1 Российская Федерация, МПК E04G 23/00. Способ реконструкции зданий и сооружений : № 2023123146 : заявл. 05.09.2023 : опубл. 05.06.2024 / С. М. Анпилов, В. В. Бондарь, В. Т. Ерофеев [и др.]. – EDN WGNQBR.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 02.09.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 02.09.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья

УДК 624.07.6

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

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

doi:10.51608/26867818_2025_4_28

К ВОПРОСУ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ ЗОЛЬНОГО НЕАВТОКЛАВНОГО ГАЗОБЕТОНА

© Авторы 2025

SPIN: 5254-3848

БЕЛОВ Владимир Владимирович

доктор технических наук, заведующий кафедрой производства
строительных изделий и конструкций

*Тверской государственный технический университет
(Россия, Тверь)*

SPIN: 9347-7926

КУЛЯЕВ Павел Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений
Тверской государственный технический университет

(Россия, Тверь)

SPIN: 7431- 8742

БАРКАЯ Темур Рауфович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой конструкций и сооружений
Тверской государственный технический университет

(Россия, Тверь)

SPIN: 5909-7100

СОКОЛОВ Сергей Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры конструкций и сооружений
Тверской государственный технический университет

(Россия, Тверь, e-mail: sokolov_project@mail.ru)

ШИШАЕВ Денис Сергеевич

магистр, кафедра «Конструкции и сооружения»

*Тверской государственный технический университет
(Россия, Тверь)*

Аннотация. Неавтоклавный газобетон (НАГБ) имеет ряд преимуществ перед традиционным бетоном, одним из которых является его низкая плотность, что делает материал относительно легким, упрощает транспортировку и монтаж. Также НАГБ является хорошим теплоизолятором, который способствует снижению теплопотерь в зданиях и сокращению затрат на отопление и вентиляцию. Однако НАГБ имеет и некоторые недостатки. Одним из основных является его невысокая прочность на сжатие по сравнению с традиционным бетоном. Кроме того, НАГБ больше подвержен усадке и трещинообразованию, что делает его менее долговечным по сравнению с обычным бетоном. Несмотря на свои недостатки, НАГБ успешно применяется в различных областях строительства в стеновых конструкциях, как конструкционный, так и теплоизоляционный материал. В работе представлены результаты исследования прочностных и деформационных свойств НАГБ с использованием золы уноса, образующейся в результате работы предприятий электротеплогенерации. Введение в состав исходной смеси зольных отходов, обладающих некоторой активностью, может способствовать снижению указанных недостатков материала, при сохранении оптимальных параметров механических характеристик. В статье показано, что зольная добавка способствует снижению усадки НАГБ за счет модификации процесса набора прочности. При этом, прочностные и деформационные характеристики широкого ряда конструкций на основе НАГБ с учетом их функционального назначения не критически уступают аналогам из обычного тяжелого бетона.

Ключевые слова: зольный неавтоклавный газобетон; деформации усадки; теплопотери; трещинообразование; прочность на сжатие

Для цитирования: К вопросу проектирования эффективных строительных конструкций из зольного неавтоклавного газобетона / В.В. Белов, П.В. Куляев, Т.Р. Баркая, С.А. Соколов, Д.С. Шишаев // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 28-33. doi:10.51608/26867818_2025_4_28.



Original article

DESIGNING EFFICIENT STRUCTURES FROM ASH NON-AUTOCLAVED AERATED CONCRETE

© The Author(s) 2025

BELOV Vladimir Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Head of the Department
Tver State Technical University
(Russia, Tver)

KULIAEV Pavel Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
Tver State Technical University
(Russia, Tver)

BARKAYA Temur Raufovich

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

SOKOLOV Sergey Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
Tver State Technical University
(Russia, Tver, e-mail: sokolov_project@mail.ru)

SHISHAEV Denis Sergeyevich

Master's degree
Tver State Technical University
(Russia, Tver)

Abstract. Non-autoclaved aerated concrete (NAAC) is a lightweight structural material that has been used in construction for years. NAAC has a number of advantages over traditional concrete. One of the main advantages is its low density, which makes it lighter and simplifies transportation and installation. NAAC is also a good thermal insulator, which helps to reduce heat loss in buildings and reduce heating and ventilation costs. However, NAAC has some disadvantages. One of the main disadvantages is its lower compressive strength compared to traditional concrete. NAAC is not suitable as a structural material for the design of load-bearing structures and structures operating under conditions of intense and dynamic loads. In addition, the concrete is prone to shrinkage and increased cracking, which makes it less durable compared to conventional concrete. Despite its disadvantages, NAAC is successfully used in various fields of construction, including in low-rise buildings, in the construction of partitions and load-bearing structures, as a structural and thermal insulation material. The paper presents the results of a study of the strength and deformation properties of prisms made on the basis of ash non-autoclaved aerated concrete. Their higher thermal energy efficiency is shown: heat loss in the nodes of window openings using lintels made of ash aerated concrete of non-autoclave hardening is 50% less than for similar nodes made of ordinary heavy concrete. It is shown that the ash additive helps to reduce the shrinkage of the NAAC due to modification of structure formation (formation of uniform diameters of gas micropores and their distribution in a unit volume of concrete), redistribution of deformations in favor of the elastic part under prolonged loading, which, in particular, is explained by encapsulation of the solid mineral component in gas micropores. It is shown that the strength and deformation characteristics of structures based on NAAC are inferior to those of conventional concrete.

Keywords: ash non-autoclaved aerated concrete; shrinkage deformations; heat loss; cracking; compressive strength

For citation: Designing efficient structures from ash non-autoclaved aerated concrete / V.V. Belov, P.V. Kuliaev, T.R. Barkaya, S.A. Sokolov, D.S. Shishaev // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 28-33. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_28.

Введение. Современный газобетон – инновационный строительный материал, применяемый в строительной индустрии, где поровое пространство составляет до 80% его объема. Такие свойства, как прочность, долговечность, вязкость, теплопередача

и влаготдача, зависят от размера пор и их микро-структуры [1-2]. Этот пористый материал обеспечивает высокую звукоизоляцию и теплоизоляционные функции [3]. Плотность в сухом состоянии колеблется от 600 кг/м³ до 1500 кг/м³, и как правило сте-



новые конструкции из газобетона имеют меньший вес, чем выполненные из большинства альтернативных материалов – глиняных и силикатных кирпичей, бетонных блоков и проч. В работе [4] изучалась прочность на сжатие и плотность НАГБ на основе рисовой шелухи, а в работе [5] золы-отвала. Результаты экспериментов показали, что при плотности блоков в сухом состоянии от 600 кг/м³ до 1200 кг/м³, прочность на сжатие составила 3-5 МПа, а предел огнестойкости достигал 7 часов. Сравнение с эксплуатационными характеристиками стен из керамического кирпича (как основного альтернативного материала) показывает, что их значения вполне сопоставимы. Однако из-за увеличения пор прочность на сжатие снижается, а деформативность возрастает.

В зависимости от способа твердения газобетон бывает двух типов: автоклавный газобетон (АГБ) и неавтоклавный газобетон (НАГБ). На сегодняшний день наибольшее распространение получил АГБ в виде блоков заводского изготовления широкой номенклатуры размеров, плотности и прочности. Однако преимущества монолитного исполнения многих строительных конструкций очевидны, а для этих целей автоклавный метод вряд ли применим. В этом исследовании рассматривается бетон, полученный методом неавтоклавного твердения (НАГБ), в котором набор прочности контрольных образцов проходил в естественных условиях. Неавтоклавный газобетон может быть изготовлен либо с использованием пенообразователя, либо с использованием воздухововлекающего агента.

В данной работе в качестве воздухововлекающего агента использовался высокодисперсный порошок алюминия в виде пасты, получаемой добавлением к алюминиевой пудре марок ПАП диэтиленгликоля в качестве вяжущего. По свойствам паста не отличается от пудры, но при этом не пылит, что снижает взрывоопасность и негативные факторы воздействия на окружающую среду и человека.

Газобетон получают в результате химической реакции, которая происходит в свежем растворе. При смешивании алюминиевого порошка с гидроксидом кальция и щелочью, из цемента и извести выделяется водород, который вызывает образование пузырьков в смеси. Пузырьки увеличивают объем смеси. Таким образом, в затвердевшем бетоне создается значительный объем пустот по большей части в виде закрытых пор, оставшихся в результате реакции.

Физические и механические свойства газобетона неавтоклавного твердения могут варьироваться в широком диапазоне в зависимости от количества используемого сырья, состава смеси и условий твердения [6-8]. Важно отметить, что многие свойства НАГБ как теплоизоляционного и конструкционного материала могут быть представлены в виде функций

насыпной плотности и толщины, качества и параметров микроармирования [9-11].

В качестве базовых свойств НАГБ, параметры которых должны обеспечивать приемлемые эксплуатационные характеристики материала, следует отметить капиллярность, коэффициент растрескивания при тепловом расширении, усадка, ползучесть, плотность, износостойкость, трещиностойкость, огнестойкость, морозостойкость, газо- и водопроницаемость, удельная теплоемкость, звукопоглощение, прочность на сжатие, растяжение, сдвиг и сцепление с арматурой, модуль деформаций.

В данной работе целью было получение облегченного зольного неавтоклавного газобетона с плотностью 1000-1300 кг/м³, классом по прочности при сжатии не менее В5, который отвечал бы не только теплотехническим, но и конструкционным требованиям, при проектировании конструкций и узлов, где применение традиционных бетонов менее оправдано. При этом исследовались физико-механические и теплотехнические характеристики НАГБ, плотность и коэффициент теплопроводности, прочность на сжатие, модуль деформации и усадка.

Модели и методы. В настоящей работе исследовались свойства двух составов НАГБ со средним значением плотности 1300 кг/м³ (табл.1).

Таблица 1 – Расход компонентов (кг) на 1 м³ газобетонной смеси

Компонент	Состав 1	Состав 2
цемент	360	320
щебень	-	-
зола	150	380
песок	420	160
известь	59	56
жидкое стекло	8	10
АП (эмульсия)	30	36
С-3	10	9,6
вода	280	270
ВВ добавка AIR 125, %	-	-

В качестве опытных образцов для исследования физико-механических свойств были изготовлены кубы 100×100×100 мм и призмы 100×100×400 мм. После выдерживания образцов в течение 28 суток были проведены испытания для определения прочностных и деформационных характеристик. Испытания проводились на 50-тонном гидравлическом прессе.

Испытания образцов на сжатие проводились по методике, описанной в ГОСТ 10180-2012. Для ячеистых бетонов прочность определяется как среднестатистическое значение всех испытанных образцов серии. Для состава №2, например, среднее значение прочности принималось по данным испытаний четырех опытных групп (табл. 2)

Таблица 2 – Экспериментальная прочность серий контрольных образцов

Класс	Прочность, МПа
Образец-куб «А»	7,6
Образец-куб «Б»	9,8
Образец-куб «В»	10,4
Образец-куб «Г»	11,2

Оценка усадки и определение модуля деформации производилась на призмах размерами 100×100×400 мм. База между центрами крепёжных болтов составляла 260 мм. Измерение деформаций заключалось в фиксации сокращения размера образца относительно базы (в %). При уменьшении длины образца стальной стержень каркаса-обоймы, упирающийся в индикатор, сохранял размер за счёт прочной фиксации крепёжных болтов в теле бетона. Определение модуля деформации газобетона проводилось путём сжатия образцов, с установленными индикаторами перемещения на прессе. Нагрузка прикладывалась ступенями с последующей выдержкой, скорость нарастания нагрузки была – 0,1 кН/с. При этом, использовались индикаторы часового типа и измерительная линейка (рис. 1).

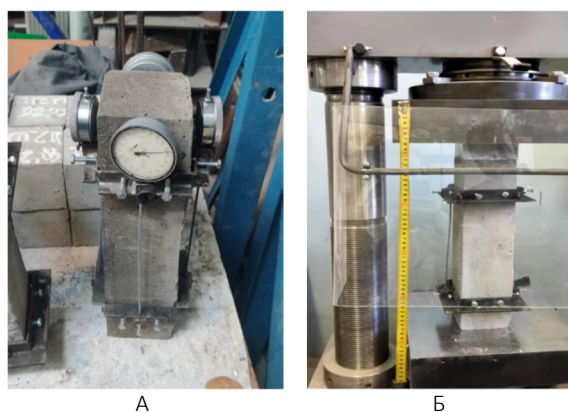


Рисунок 1 – Измерение усадки (А) и модуля деформации (Б)

Влияние длительного воздействия сжимающей нагрузки на физико-механические свойства НАГБ, с последующим определением модуля деформации, было исследовано при проведении испытаний на сжатие до разрушения двух серий образцов-близнецов, призм, одни из которых находились под действием длительного сжатия, затем разгружались и лишь потом испытывались до разрушения, а образцы другой серии нагружались однократно до разрушения. Испытание образцов обеих серий было проведено в одинаковом возрасте. Сжимающая нагрузка при испытании призм на длительное сжатие принималась порядка 75% от прогнозируемой нагрузки разрушения призмы, которая в свою очередь принималась равной 0,6 разрушающей

нагрузки на образец-куб, или 45,4 кН. С учетом этого, нагрузка при испытании призмы на длительное сжатие составляла 34,75 кН. Испытания образцов при постоянной нагрузке проводились на специальных пружинных установках. Фиксация сжимающего усилия поддерживалась с помощью блока пружин в нижней части установки. Перед началом испытания пружины поджимались гидравлическим домкратом на вычисленную величину нагрузки, после чего фиксировались в сжатом положении с помощью верхней пластины гайками (рис. 2).



Рисунок 2 – Образец и установка для испытания на длительное сжатие



Рисунок 3 – Измерение коэффициента теплопроводности прибором ИТП-МГ4 «Зонд» (А-фиксация щупа-датчика в образце, Б – прибор с индикацией показаний)



Теплопроводность материала (коэффициент теплопроводности) оценивалась с использованием прибора ИТП-МГ4 (рис. 3).

Результаты исследования и их анализ. Номера составов и экспериментальные значения прочности на сжатие, модуля деформации и деформации усадки приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Номера составов и экспериментальные значения прочности на сжатие, модуля деформации и усадки

№ состава	$R_{сж}$, МПа	E , кН/см ²	Усадка, %
1	7,55 (класс В6)	225	0,23
2	9,3 (класс В7.5)	295	0,19

Номера составов и соответствующие расчетные значения коэффициентов теплопроводности и усредненной плотности приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Коэффициенты теплопроводности и усредненное значение плотности двух составов газобетона

№ состава	Коэффициент теплопроводности λ , Вт/м·К	Средняя плотность ρ , кг/м ³
1	0,36	1310
2	0,31	1240

При повышении содержания золы в 2,5 раза в составе НАГБ было зафиксировано снижение значения коэффициента теплопроводности на 13,8 % и усадки – на 17,4%, повышения модуля деформации и прочности на сжатие на 22%. Данный вид бетона по физико-механическим характеристикам не уступает обычному бетону, а применение его в качестве теплоизоляционного и конструкционного материала в элементах, работающих на низкоинтенсивные статические нагрузки с повышенными теплоизоляционными свойствами более эффективно.

При анализе влияния длительного сжатия на физико-механические характеристики НАГБ, было установлено следующее. Разрушение призмы А, подвергнутой предварительному длительному обжатию, произошло при нагрузке 88,26 кН (90 кгс/см²), а призмы Б, без предварительной выдержки под сжимающей нагрузкой, при 73,55 кН (75 кгс/см²). После проведения испытания на образцах-призмах можно сделать вывод, что воздействие длительного сжимающего усилия на образцы порядка 75% от призмной прочности, не ухудшает физико-механические свойства НАГБ, а наблюдается обратный эффект: образец после выдержки под сжимающей нагрузкой, разрушается при более высоких значениях сжимающей нагрузки. При этом, характер деформирования является более упругим. Очевиден

эффект уплотнения и гомогенизации структуры НАГБ под длительным действием сжимающей нагрузки.

Выводы. Полученные в результате экспериментов данные вполне согласуются с основной целью работы - получить эффективный НАГБ с комплексом теплотехнических и физико-механических свойств, отвечающих требованиям, предъявляемым к легким конструкционным видам бетонов.

Показано, что оптимизация указанных эксплуатационных свойств газобетона может осуществляться за счет варьирования основных компонентов НАГБ, его модификации химическими и минеральными добавками. В свою очередь, матрица бетона определяет основные его свойства: среднюю плотность и теплопроводность, предел прочности на сжатие, усадку, и модуль деформации. В данном случае применение тонкодисперсного компонента - золы в качестве минерального наполнителя улучшает как теплотехнические, так и физико-механические свойства (снижение усадки и повышение значений прочности на сжатие и модуля деформации) НАГБ. Зольная тонкодисперсная добавка способствует снижению усадки НАГБ за счет модификации структурообразования. Показано, что предварительная выдержка образцов-призм из НАГБ под сжимающей нагрузкой порядка 75% от разрушающей, не только не ухудшает физико-механические свойства НАГБ, но и ведет к модификации структуры матрицы через уплотнение и гомогенизацию. Происходит рост прочности и модуля деформации зольного НАГБ при одновременном снижении средней плотности. При этом задействуются дополнительные вяжущие свойства кальцийсодержащей золы. Все это позволяет отнести НАГБ с зольным тонкодисперсным компонентом к энергоэффективным и конструкционным материалам, который может при определенных условиях заменить традиционные бетоны в конструкциях и узлах (стыках элементов) с повышенными теплоизоляционными характеристиками: компенсация мостиков холода в слабонагруженных несущих и самонесущих элементах (стенах, перемычках, торцевых участках перекрытий и т.д.), особенно при монолитном строительстве.

Библиографический список

1. Guglielmi P. O., W. R. L. Silva, et al, " Porosity and Mechanical Strength of an Autoclaved Clayey Cellular Concrete", Advances in Civil Engineering Volume 2010, Article ID 194102, 6 pages, 2010.
2. Narayanan N., Ramamurthy K., Structure and properties of aerated concrete: a review, Cement & Concrete Composites 22 , 321±329, 2000.
3. Jani Sohani n., Shah Darshan s., Analysis of microstructure and properties of AAC block with its manufacturing process, Journal Of International Academic Research For Multidisciplinary, Volume 2, Issue 7, August 2014.



4. Begum, R., Habib, A. and Mostafa, S. (2014) Effects of Rice Husk Ash on the Non Autoclaved Aerated Concrete, *International Journal of Engineering Innovation & Research*, 3(1), pp. 116121.

5. Chen, Y. et al. (2017) A comprehensive study on the production of autoclaved aerated concrete: Effects of silica-lime-cement composition and autoclaving conditions, *Construction and Building Materials*. Elsevier Ltd, 153, pp. 622629. doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.116.

6. Сулейманова, Л. А. Газобетон неавтоклавного твердения на композиционных вяжущих : диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Сулейманова Людмила Александровна, 2013. – 390 с. – EDN VYXYNM.

7. Энергоэффективные неавтоклавные бетоны / А. С. Чукин, И. С. Домников, М. Б. Х. Кодзоев, С. Л. Исаченко // *Строительство - формирование среды жизнедеятельности* : Электронный ресурс: сборник трудов XX Международной межвузовской научно-практической конференции студентов, магистрантов, аспирантов и молодых учёных, Москва, 26–28 апреля 2017 года. – Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, 2017. – С. 905-907. – EDN YZAAWX.

8. Векслер, М.В. Неавтоклавный пенобетон. Конкуренция с автоклавным газобетоном / М.В. Векслер, А.Б. Липилин // *Строительная логика: сб. статей*. – 2013.

9. Славчева, Г. С. Перспективы применения неавтоклавных цементных поризованных бетонов в современном строительстве / Г. С. Славчева, К. С. Котова, Я. З. Афашагова // *Научные и инженерные проблемы строительно-технологической утилизации техногенных отходов*, Белгород, 15–23 марта 2014 года / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Том выпуск 13. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2014. – С. 211-217. – EDN SCUPVX.

10. Петровская, Ю. В. Дисперсное армирование газобетона волокном / Ю. В. Петровская, А. В. Фролова // *Молодые ученые - развитию текстильно-промышленного кластера (ПОИСК)*. – 2017. – № 2. – С. 421-423. – EDN WXPZV.

11. Управление физико-механическими характеристиками неавтоклавного цементного поризованного бетона путем его микроармирования / Н. А. Белькова, М. П. Степанова, Д. Е. Курбаков, Г. Г. Супрунчик // *Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета*. – 2021. – № 2(47). – С. 82-90. – DOI 10.24866/2227-6858/2021-2-9. – EDN KILLIE.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 29.09.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 29.09.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья
УДК 691.328
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
BAK: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2025_4_34

ПОКАЗАТЕЛЬ МОРОЗОСТОЙКОСТИ БЕТОНА И ДОЛГОВЕЧНОСТЬ ПЛИТ АЭРОДРОМНЫХ ПОКРЫТИЙ ПАГ-14

© Автор 2025
AuthorID: 1062052

БОЙКО Виктор Григорьевич
кандидат технических наук, доцент по кафедре строительной механики
и инженерных конструкций
Приморский государственный аграрно-технологический университет
(Россия, Уссурийск, e-mail: boykolab@Gmail.com)

Аннотация. В статье представлена зависимость между показателем морозостойкости и техническим состоянием аэродромной плиты покрытия с проверкой по результатам испытаний кернов отобранных из плит и образцов, испытанных на морозостойкость бетона в процессе их изготовления. Даны предложения по правилам отбора проб при проведении технического обследования, их испытаний на морозостойкость.

Ключевые слова: морозостойкость бетона; техническое состояние плиты; плиты аэродромного покрытия; долговечность плит; строительные материалы

Для цитирования: Бойко В.Г. Показатель морозостойкости бетона и долговечность плит аэродромных покрытий ПАГ-14 // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 34-39. doi:10.51608/26867818_2025_4_34.

Original article

INDEX OF FROST RESISTANCE OF CONCRETE AND DURABILITY OF SLABS OF AIRFIELD PAVEMENTS OF PAG-14

© The Author(s) 2025

BOYKO Viktor Grigorievich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
Primorsky state agrarian-technological university (Russia, Ussuriisk)

Abstract. The article presents the relationships between frost resistance indices and the technical condition of the airfield slab with verification based on the results of testing cores of shiny slabs and samples tested for frost resistance of concrete during their manufacture. Proposals are given on the rules for sampling during technical inspection and testing for frost resistance.

Keywords: frost resistance of concrete, technical condition of the slab; airfield pavement slabs; durability of slabs; building materials

For citation: Boyko V.G. Index of frost resistance of concrete and durability of slabs of airfield pavements of PAG-14 // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 34-39. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_34.

Введение. В процессе реконструкции аэродрома Оха, через два года из 8000 уложенных плит ПАГ-14 А800.1 (изготовитель АО «ЖБИ-3»), на 341 плите появились очаги разрушения в виде шелушения поверхности. Для проведения обследования была привлечена испытательная лаборатория ООО «САХАЛИНСТРОЙКОНТРОЛЬ». Отобраны 18 кернов, из них 9 по просьбе изготовителя были переданы в Научно-производственную лабораторию качества строительного производства ПГАТУ (г. Уссурийск). По решению Арбитражного суда Приморского края АО «НТК» «АЭРОТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР» [1], провел судебно-строительную экспертизу. Из 24 плит было отобрано по одному керну диаметром 104 мм. Лабо-

раторные испытания образцов выполнили в АНИТЦ «СОКРАТ» при ПГУПС. Результаты испытаний тремя лабораториями явились причиной написания данной статьи.

Методика определения расчетной долговечности плит ПАГ-14. При наблюдении за техническим состоянием образцов испытываемых по методам ГОСТ [2], а также отдельного участка элементов конструкций или изделий, можно разделить по продолжительности на два периода. Первый – до появления признаков разрушений, (трещин, шелушения поверхности). Второй – период интенсивного развития деструкции, разрушения бетона, которое начинается с поверхности, углубляясь в толщу элемента кон-



струкции, изделия. Фактическую продолжительность эксплуатации запишем в виде

$$T_{\Phi} = T_1 + T_{\Phi} - T_1. \quad (1)$$

Произведение $T_1 \cdot n$ есть показатель морозостойкости M , то скорость разрушения поверхностного слоя на первом периоде при лабораторных испытаниях образца [3], $\delta_1 = \frac{a(1-\sqrt{K_f})}{2M}$, а на втором прием равным $T_{\Phi} - T_1$, $\delta_2 = \frac{a}{2M}$. Тогда глубина разрушения $h_k = \delta_1 T_1 + \delta_2 T_2$, будет равна

$$h_k = a/2 \left(\frac{T_{\Phi} \cdot n}{M} \sqrt{K_f} \right) \quad (2)$$

где a – сторона образца куба ($a = 100$ мм). Коэффициент снижения прочности (коэффициент морозостойкости) $K_f = 0,9$. Число циклов за единицу времени n получим из выражения (2)

$$n = \frac{M(2h_k/a + \sqrt{K_f})}{T_{\Phi}} \quad (3)$$

Отобрав образец анкер в очаге разрушений (шелушения поверхности и др.) и определив по нему глубину разрушившегося слоя « h_k », показатель морозостойкости « M », по формуле (3) можно определить число циклов замораживания и оттаивания n за один год эксплуатации.

Зависимость расчетного наступления неудовлетворительного состояния плиты определим, подставив значение T_{Φ} из формулы (3) в формулы приведенные в СП [6] получим

$$T_p = \frac{M(2\frac{h_k}{a} + \sqrt{K_f})2,5}{5(5-MI)n} \text{ или } T_p = \frac{M(2\frac{h_k}{a} + \sqrt{K_f})2,5}{(5-Sk)n} \quad (4)$$

где MI – индекс сохранения, Sk – индекс качества. Расчетное число циклов замораживания и оттаивания за один год эксплуатации определим по формуле (4), при заданной морозостойкости $M = F200$, $T_p = T_{\Phi} = 20$ лет [5], $h_k = 40$ мм [6], $n = \frac{200(80/100 + \sqrt{0,9})}{20} = 17,5$ циклов/год. При 83,3% процентах шелушения поверхности плиты, т.е. неудовлетворительном состоянии по табл.8.1 [6], коэффициент весомости дефекта $Sk' = 5 - 3A_{\text{ш}}/A = 5 - 3 \cdot 83/100 = 2,5$. $Sk = 5 - Sk' = 2,5$ расчетное число циклов замораживания и оттаивания за год эксплуатации составит

$$n = \frac{200(80/100 + \sqrt{0,9})}{20} = 17,5 \text{ циклов/год.}$$

Методика определения показателя морозостойкости бетона. Для оценки расчетного определения наступления неудовлетворительного состояния плиты необходимо знать показатель морозостойкости. Каждый испытываемый образец имеет свой показатель морозостойкости « M », то есть число циклов, при котором достигается установленное значение характеристик бетона. При испытаниях по ГОСТ [2] это может быть снижения прочности (коэффициент морозостойкости $K_n = K_f = 0,9$), снижение скорости ультразвука и др. [7]. Марка бетона « F » установленное число циклов по базовым методам, задаваемое при проектировании при $K_f = 0,9$. Действующий ГОСТ [2] не предусматривает определения показателя

морозостойкости отдельно взятого основного образца так и среднего его значения по 6 основным и по базовым методам требуется минимум 18 образцов из одного замеса. Но установить показатель морозостойкости M можно имея два образца базовый и контрольный, а при поверхностном прозвучивании достаточно одного образца, но только при наличии зависимости коэффициента морозостойкости $K_n = f(N)$. На основании исследований в работе [3] предложена зависимость $K_n = f(\xi)$, где $\xi = N/M$

$$K_n = [1 - \xi + (c + 1)\xi\sqrt{K_f}/(c + \xi)]^2 \quad (5)$$

где, C – индекс интенсивности развития морозной деструкции и экспериментально установлено, что он может изменяться от 0 до 6. На рис.1. показана зависимость коэффициента морозостойкости K_n от относительного числа циклов $\xi = M/N_{\Phi}$. При $\xi \geq 1,0$ коэффициент морозостойкости можно принять $K_n = (2 - \xi)/1,1$ и тогда показатель морозостойкости будет $M = N_{\Phi}/(2 - 1,1K_n)$, где N_{Φ} фактическое число циклов.

Формулы (5) и (6) могут быть применены, при наличии на образце появиться трещина с шириной раскрытия не менее 0,01 мм., т.е. при $\xi \geq 1,0$.

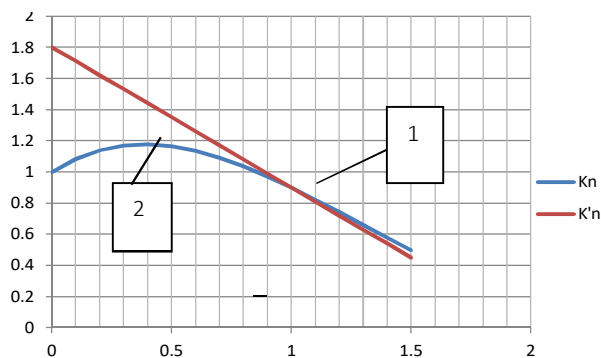


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента морозостойкости от относительного числа циклов ξ (размер испытываемого образца 100x100x100 мм)

$$1 - K_n = [1 - \xi + (c + 1)\xi\sqrt{K_f}/(c + \xi)]^2;$$

$$2 - K'_n = (2 - \xi)/1,1; \text{ при } C=3.$$

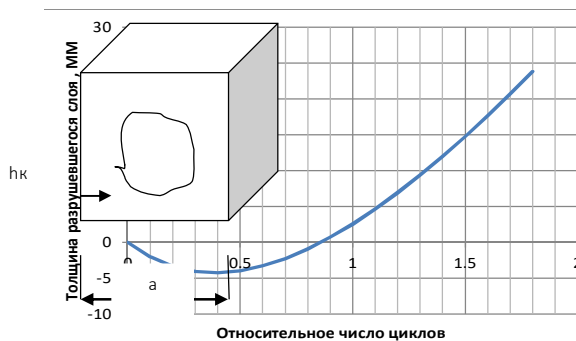


Рисунок 2 – Зависимость глубины разрушившегося слоя бетона h_k от ξ , где $h_k = 50[\xi - \sqrt{K_f}(C + 1)\xi/(C + \xi)]$ при $C=3$, и $a/2=50$ мм



Результаты экспериментальных исследований.

а) Результаты испытаний образцов кубов 100х100х100 мм

В табл. 1. Приведены составы бетонной смеси для плит и образцов кубов. Во всех составах применялся цемент ПЦ 500 ДОН АО «Спасскцемент». Добавка «Кратосол- ПФМ» 0,6% от массы цемента.

Таблица 1 – Состав бетона

№ Серии	Год	Ц	П	Щ	В+Д	Р _б , кг/м³	Примечание
1	2019	450	740	1050	145	2368	Песок «Павловский», М _к =2,5
2		480	680	1100	145	2408	Карьер «Приморский», М _к =2,2
3		450	720	1050	135	2358	Песок «Новошахтинский», М _к =2,8
4,5	2020	450	720	1050	140	2363	Песок «Новошахтинский», М _к =2,8

Таблица 2 – Результаты испытаний образцов кубов испытанных по второму базовому методу в лаборатории ПГАТУ

№ п/п	Серия	1	2	3	4	5	6
1	Дата изготовления	15.02.19	27.03.19	11.10.19	27.03.20	29.11.21	27.03.22
2	Возраст, в сутках	52	163	76	62	112	82
3	Начальная масса, г	2372	2393	2360	2292	2392	2391
4	Насыщенных в 5% р-ре	2412	2425	2405	2371	2423	2432
5	R _к , МПа	46,4	47,3	46,0	41,1	51,4	46,7
6	Число циклов	337	35	200	285	214	200
7	Масса образцов, г	2415	2434	2421	2394	2425	2416
8	Трещины, мм	Нет	0,05	0,03	0,05	нет	0,015
9	Козф. морозостойкости	1,24	1,04	0,86	0,734	1,21	1,03
10	M, в циклах	530	41	190	230	437	230



Рисунок 3 – Вид образца №3 после 285 циклов серии 4, с шириной раскрытия трещины 0.05 мм; K_п = 0,67; M = 226 циклов, марка F₂200



Рисунок 4 – Вид образцов кернов диаметром 69,2 мм, высотой 140 мм взятых из плит и переданных в научно производственную лабораторию Приморского Агро-технологического Университета (ПГАТУ)

Таблица 3 – Результаты испытаний кернов после 200 циклов по второму базовому методу в лаборатории ПГАТУ, с 9.06.2022г.

Серия	№ керна	Масса, г	Показания УКС-МГ4	ΔУ, %	Р _{раз.} , Кн.	Р _о /R _к , Мпа	K _п	а _к , мм	Показатели М/Ф
№9/425 27.07.20	2	1270/1275	2976/5080	41,4	100	28,9/50,4	0,57	0,02	M146/F150
	3	1270/1270	3137/5131	38,8	137	39,4/50,4	0,78	0,02	M175/F175
№3/38 31.08.20	2	1285/1280	3351/4973	32,6	124	32,9/55,5	0,59	0,02	M148/F150
	3	1280/1280	4785/5006	18,5	184	53,2/55,5	0,96	0,02	M212/F200
№3/39 31.08.20	2	1230/1225	2943/5112	42,4	122	35,4/45,5	0,78	0,01	M175/F175
	3	1240/1240	3527/5135	31,3	128	36,7/45,5	0,81	0,02	M198/F200



Таблица 4 – Результаты испытаний кернов после 13 циклов по третьему ускоренному методу в лаборатории «Сахалинстройконтроль», с 04.06.2022

Серия	Диаметр, в мм	Высота, средняя в мм	Прочность, R_o , МПа	Плотность в $кг/м^3$	Потеря массы, %	Средняя масса, г
№523 07.07.20	69,3	48,03	54,5/49,8	2299	12,0	416
№522 23.07.20	69,3	70,6	49,9/46,7	2334	17,5	621
№3/39 31.08.20	69,3	51,4	41,4/49,8	2317	28,9	449

Таблица 5 – Результаты испытаний на морозостойкость («СОКРАТ» при ПГУПС, третий ускоренный метод), с 15.12.2023г. (средние значения по 24 кернам)

Годы изгот. плит	Диаметр в мм	Высота в мм	Масса кернов, г	Масса насыщенных, г	После 20 циклов	
					Потеря массы, %	Снижение ультразвука, %
2019-2020г	104	138	2804	2834	6,4	15,8

Анализ результатов исследований. Из таблицы №2 видно, что наименьшую морозостойкость показали образцы серии №2 (М41), а средний показатель за 2019-2020 годы составил М156 (F150), что согласуется с данными приведенными в таблице №3. Определим число циклов замораживания и оттаивания за один год эксплуатации плиты. По результатам испытаний образцов кубов наименьший показатель морозостойкости М41 цикл по базовому методу. Примем его в очаге шелушения. Очаговое наличие шелушения на плитах, в среднем 15% на одной плите.



Рисунок 5 – Вид образцов кернов после 200 циклов замораживания и оттаивания по второму базовому методу

Глубина разрушения h_k до 5мм., и на момент отбора образцов кернов лабораторией ТФ = 2,7 года продолжительности климатических воздействий. По СП [6], табл. В1 индекс сохранения $Sk = 5 - S'_k$, где в центре очага $S'_k = 5 - 3A_{ш}/A = 5 - 3 \cdot 85/100 = 2,5$. Подставим эти значения формулу (3) получим

$$n = \frac{41(10/100 + \sqrt{0,9})}{2,7} = 15,91 \text{ циклов/год.}$$

Рассмотрим пример определения расчетного наступления неудовлетворительного состояния одной из 341 отобранной плиты. По результатам обследований глубина разрушений $h_k = 5$ мм, площадь участков шелушений 15%. По табл. В.1 [6] $MI = 5 - \Sigma 1 \cdot 0,15 \cdot 3 = 4,55$.

По формуле (5) в работе [6]

$$T_p = \frac{2,5T_f}{(5 - MI)} = \frac{2,7 \cdot 2,5}{(5 - 4,55)} = 15 \text{ лет.}$$

По предлагаемой методике опытные значения морозостойкости по скорости снижения ультразвука М159 (среднее значение по 6 кернам табл. 3, $M = 200/2 - 1,1 \cdot K_n = 200/1,1 - 0,658 = M 157$, при $MI = 2,5$, с учетом что h_k уменьшилось на момент обследования ($h_k - 5$ мм) $= 40 - 5 = 35$ мм получим

$$T_p = 157 \frac{(\sqrt{0,9} + 2 \cdot 35/100)}{15,91} = 16,27 \text{ года.}$$

По индексу сохранения Sk формуле (4), $Sk = 5 - Sk^1, Sk^1 = 5 - 3 \cdot 0,15 = 2,55$

$$T_p = \frac{157(\sqrt{0,9} + 2 \cdot 35/100)}{(5 - Sk) \cdot 15,91} \cdot 2,5 = 16,61 \text{ года.}$$

Таблица 6 – Показатели морозостойкости образцов кернов

№ п/п	Наименование показателя	Обозначение	«ПГАТУ», 2 базовый метод			«СОКРАТ», 3 ускоренный
			Кубы	Керны		Керны
				Цилиндр	Ультразвук	Ультразвук
1	Прочность	R_k	46,0	48,6	-	
2	Масса	G	2405	1262	1262	2834
3	Снижение ультразвука	Δ_y	-	-	34,17	15,8
4	Коэффициент морозостойкости	K_n	0,86	0,748	0,658	0,842
5	Показатель	M	M190	170	M157	M186

Видно, что результаты по методике СП [6] определения расчетного наступления неудовлетворительного состояния плиты покрытия и предлагаемой совпадают. Для дальнейшего применения необходимо определять показатели морозостойкости как в местах, не имеющих следов морозной деструкции, и непосредственно в очаге, определяя как морозостойкость, так и глубину ее развития. Сравнивая результаты испытаний образцов полученных лабораторно-



Таблица 7 – Результаты испытаний на морозостойкость по второму базовому методу ГОСТ 10060-2012

№ п/п	Масса, г	Масса после насыщения, г	Δ m, г	Масса и прочность основных образцов после 365 циклов					Морозостойкость М, циклов
				Масса, г	Δ m, г	R ₀ , МПа	K _N	a _{ср} , мм	
3	2430	2445	15	2445	0	74,0		Нет	473
4	2440	2453	13	2455	2	67,2		Нет	407
Среднее	2435	2449	14	2450	1	70,6	1,19	Нет	440
7	2292	2305	13	2320	15	42,0		0,02	293
8	2290	2302	12	2320	18	43,0		0,02	299
Среднее	2291	2304	13	2320	17	42,5	0,714	0,02	296

Примечание: Среднее по контрольным образцам № 1 и 2 $\bar{R}_K$ = образцов № 3, 4%, W = 4,5%, а образцов № 7, 8 - W = 5,1%. 68,35 МПа, по образцам № 5 и 6 $\bar{R}_K$ = 59,5 МПа $K_N = \frac{R_0}{R_K} M_I = 0,8N / (1,7 - K_N)$; влажность после 365 циклов



Рисунок 6 – Вид образцов после 365 циклов замораживания и оттаивания. Трещины определены микроскопом МПБ-2

рией «Сахалинстройконтроль» и «СОКРАТ» можно видеть, что потеря масс отличается в 2-4 раза. Если рассчитать потерю с единицы площади за один цикл замораживания и оттаивания, то они окажутся равными (0.0361 г/см²цикл). Это подтверждает влияние «масштабного» фактора при испытаниях на морозостойкость по третьему ускоренному методу. В таблице 6 приведены результаты испытаний образцов в лабораториях «ПГАТУ» и «СОКРАТ» по изменению скорости прохождения ультразвука и прочности.

Показатель морозостойкости, если учесть что керны подверглись замораживанию оттаивания в течении 2-2,7 лет, то добавив 30 циклов можно сделать заключение, что бетон демонтированных плит соответствует требуемой марки по морозостойкости F₂₀₀, т.е. не менее требуемой по [5]. Заключение [1], что причиной поверхностного разрушения плит является нарушение в технологии изготовления, а в чем именно, не раскрыто. В отдельных очагах произошло разрушение из-за низкой морозостойкости бетона видно невооруженным взглядом. Где же фактическая морозостойкость? Возможно большой расход цемента (см. табл. 1. серия 2), как известно снижающий морозостойкость бетона? Или низкой культуры производства, в частности отсутствия текущего контроля за морозостойкостью бетона плит согласно [5] предусматривающего испытания образцов раз в полгода.

Выводы и предложения

1. При производстве железобетонных плит отсутствует текущий контроль морозостойкости бетона с применением статистических методов обработки. Испытание 18 образцов из одного замеса раз в полгода, когда только на одну плиту требуется два замеса, не оказывает влияния на конечный результат.

2. Необходимо внести в действующий ГОСТ [2] зависимость (6) или другую по которой определять показатель морозостойкость в виде конкретной величины, а марку считать показателем морозостойкости задаваемой при проектировании. Для опытного определения конкретных значений показателя морозостойкости. Применять два образца близнеца (контрольный и основной) из одного замеса.

3. Предлагается при производстве плит изготавливать образцы кубы с пластиной вставленной в днище (см. пример в табл. 7, и рис. 6). Из плиты предлагается отбирать бетонную смесь из каждого замеса в количестве не менее чем для изготовления двух близнецов кубов. При испытаниях на морозостойкость периодически осматривать образцы с помощью лупы для определения момента возникновения трещин, а затем микроскопом для уточнения момента возникновения и определения ширины их раскрытия.

4. При проведении технического обследования аэродромных плит покрытия применять керны диа-



метром 100 мм, отбирая в очаге шелушения (морозной деструкции) и в местах их отсутствия по 2 образца. Образцы цилиндры диаметром 80 мм рекомендуется испытывать только по базовым методам.

5. Коэффициент морозостойкости рекомендуется определять по потере прочности (разрушающей нагрузки), так и снижению скорости прохождения ультразвука при поверхностном прозвучивании.

6. При проведении технического обследования в п.7.2.4 [6] от каждой плиты рекомендовать отбирать не менее 4 образцов в очаге разрушения 2 в не зоны.

7. При определении остаточного времени наступления неудовлетворительного технического состояния рекомендовать применять формулу 8.2 [5] и предлагаемую (4), учитывающую фактический показатель морозостойкости.

Библиографический список

1. Заключение по результатам судебной строительно-технической экспертизе по делу №А51-20189/2022, АТЦ-1193.АО «НТК «АЭРОТЕХНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР».

2. ГОСТ 10060-12. Бетоны методы определения морозостойкости.

3. Бойко, В.Г. Определение конкретных значений морозостойкости бетона при испытаниях базовыми методами ГОСТ 10060.2-95 / В.Г. Бойко, С.Ю. Калугин, В.Б. Самохвалова, В.В. Шевченко // Бетон и железобетон. 2010. №6. С. 19-22.

4. Бойко, В. Г. ГОСТ10060-2012 "Бетоны. Методы определения морозостойкости". Замечания и предложения / В. Г. Бойко, В. Б. Самохвалова // Роль аграрной науки в развитии лесного и сельского хозяйства Дальнего Востока : Материалы III Национальной (Всероссийской) научно-практической конференции. В 3-х частях, Уссурийск, 26–27 ноября 2019 года / Ответственный редактор С.В. Иншаков. Том Часть 2. – Уссурийск: Приморская государственная сельскохозяйственная академия, 2019. – С. 75-81. – EDN CPQOOI.

5. ГОСТ25912-2015. Плиты железобетонные предварительно напряженные для аэродромных покрытий. Технические условия.

6. СП 491.1325800.2020. Аэродромы. Правила обследования технического состояния.

7. СП121.13330. Аэродромы

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 22.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 22.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья

УДК 625 7/8

ГРНТИ: 67.13.69 Строительно-дорожные и путевые работы

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

doi:10.51608/26867818_2025_4_40

ОБОСНОВАНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ ПЕРЕРАБОТАННОГО АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА В ДОРОЖНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ С УЧЕТОМ ПРЕДЕЛА УПРУГОСТИ УПЛОТНЯЕМОГО СЛОЯ

© Авторы, 2025

SPIN: 4118-5150

ЗУБКОВ Анатолий Федорович

доктор технических наук, профессор

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: afzubkov2013@yandex.ru)

SPIN: 1771-7181

АНДРИАНОВ Константин Анатольевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Городское строительство и автомобильные дороги»

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: konst-68@yandex.ru)

ЗАРАПИНА Любовь Сергеевна

аспирант

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: gsiad@mail.tambov.ru)

SPIN: 1143-7510

МАМОНТОВ Александр Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: sansanich1409@yandex.ru)

SPIN: 8423-2539

МАМОНТОВ Семен Александрович

кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: kardinal61@mail.ru)

SPIN: 9764-3898

ЕЛЬЧИЩЕВА Татьяна Федоровна

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Архитектура и градостроительство»

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: elschevat@mail.ru)

Аннотация. Применение отходов при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа позволяет уменьшить затраты на приобретение минеральных материалов для строительства, ремонта и реконструкции автомобильных дорог. При разрушении покрытия получают материал в виде гранул разных размеров, зависящих от режимов работы дорожной фрезы. Установлено, что асфальтогранулят и смеси, получаемые при регенерации битумной эмульсией, соответствуют прочностным характеристикам согласно нормативной документации. Разделение асфальтогранулята по фракциям расширяет область применения материала. В качестве критерия, определяющего область применения материала при строительстве автомобильных дорог, принят модуль упругости слоя, от которого зависит область применения, качество и надежность дорожной конструкции. В статье установлены области применения переработанного асфальтогранулята и смесей, полученных при регенерации битумной эмульсией с учетом модуля упругости слоя в зависимости от размера фракций и толщины слоя при действии уплотняющей нагрузки. Полученные зависимости могут быть использованы при моделировании технологических процессов устройства дорожных конструкций с требуемыми прочностными характеристиками.



Ключевые слова: переработанный асфальтогранулят; битумная эмульсия; модуль упругости; предел упругости; дорожное строительство; дорожные конструкции

Для цитирования: Обоснование применения переработанного асфальтогранулята в дорожных конструкциях с учетом предела упругости уплотняемого слоя / А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, Л.С. Зарапина, А.А. Мамонтов, С.А. Мамонтов, Т.Ф. Ельчищева // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 40-50. doi:10.51608/26867818_2025_4_40.

Original article

RATIONALE FOR THE USE OF RECYCLED ASPHALT GRANULATE IN ROAD STRUCTURES, TAKING INTO ACCOUNT THE ELASTIC LIMIT OF THE COMPACTED LAYER

© The Author(s) 2025

ZUBKOV Anatoly Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Tambov State Technical University

(Russia, Tambov, e-mail: afzubkov2013@yandex.ru)

ANDRIANOV Konstantin Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Urban Construction and Roads»

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

ZARAPINA Lyubov Sergeevna

PhD Candidate

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

MAMONTOV Alexander Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

MAMONTOV Semyon Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

YELCHISHCHEVA Tatyana Fedorovna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Head of the Department of Architecture and Urban Planning

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

Abstract. Using waste from cold milling of flexible pavements reduces the cost of purchasing mineral materials for the construction, repair, and reconstruction of highways. When the pavement is broken down, the resulting material consists of granules of varying sizes, depending on the operating conditions of the road milling machine. It has been established that asphalt granulate and mixtures obtained by regeneration with bitumen emulsion meet the strength characteristics required by regulatory documentation. Separating the asphalt granulate by fractions expands the material's application range. The elastic modulus of the layer, which determines the application, quality, and reliability of the road structure, is used as a criterion determining the material's application range in highway construction. This article identifies the applications of recycled asphalt granulate and mixtures obtained by regeneration with bitumen emulsion, taking into account the elastic modulus of the layer depending on the fraction size and layer thickness under compaction load. The obtained relationships can be used in modeling technological processes for constructing road structures with the required strength characteristics.

Keywords: recycled asphalt granulate; bitumen emulsion; modulus of elasticity; elastic limit; road construction; road structures

For citation: Rationale for the use of recycled asphalt granulate in road structures, taking into account the elastic limit of the compacted layer / A.F. Zubkov, K.A. Andrianov, L.S. Zarapina, A.A. Mamontov, S.A. Mamontov, T.F. Yelchishcheva // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 40-50. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_40.

Введение. При разрушении покрытий нежесткого типа автомобильных дорог с применением дорожных холодных фрез получают материал в виде гранул, поверхность которых покрыта битумной пленкой. Такой материал получил название асфальтогранулят. В настоящее время он позволяет уменьшить потребность в материалах при строительстве, ремонте и реконструкции автомобильных дорог. В процессе эксплуатации автомобильной дороги битумная пленка на поверхности минеральных частиц асфальтобетона, с учетом химических процессов, становится хрупкой за счет потери вязкостных свойств, что приводит к снижению прочностных характеристик слоя. Поэтому для восстановления свойств смеси в асфальтогранулят вводят вяжущие материалы, способствующие восстановлению прочностных характеристик слоя материала. Нормативными документами определены требования к прочностным характеристикам асфальтогранулята и на их основе смесей при регенерации вяжущими материалами [1-2]. Оценка прочностных характеристик дорожной конструкции производится по модулю упругости. Установлено, что модуль упругости слоя зависит от свойств применяемого материала, конструктивных параметров слоя и уплотняющей нагрузки. Разделение отходов на фракции при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа позволяет расширить область применения асфальтогранулята. В тоже время размеры фракций влияют на модуль упругости уплотняемого слоя, что требует уточнения при его применении [3-8].

Методика проведения исследования. Для уточнения влияния размера фракций асфальтогранулята, толщины слоя, содержания битумной эмульсии в смеси и действующей нагрузки на модуль упругости слоя проведены исследования, по результатам которых получены зависимости для расчета модуля упругости слоя от перечисленных факторов. Определение модуля упругости слоя выполнялось по результатам замера упругой деформации слоя при действии циклической нагрузки по заданной величине напряжения под круглым штампом. Для установления разных факторов (толщины слоя, процентного содержания эмульсии и нагрузки) на величину упругой деформации и укладка выполнялась слоями разной толщины и процентном содержании эмульсии в смеси при заданной нагрузке. Измерение упругой деформации слоя выполнялось с помощью гидравлического пресса ПГ-500 индикатором часового типа с точностью 0,01 мм. После укладки и предварительного уплотнения слоя материала на поверхность образца устанавливался штамп. Верхнюю плиту пресса устанавливали выше уровня поверхности штампа на 1,5-2,0 мм. Для измерения деформации индикатор, прикрепленный к стойке, размещался таким образом, чтобы подвижная часть его

ножки касалась верхней плиты пресса. После этого образец материала нагружался через штамп. По заданной величине напряжения с помощью индикатора часового типа определялись перемещения штампа. После замера полной деформации слоя под нагрузкой снималась нагрузка на штамп и производился замер остаточной деформации слоя. Разница между полной и остаточной деформациями слоя позволяют определить упругую деформацию слоя в зависимости от переменных факторов. Затем цикл нагрузки с замером деформаций повторялся.

Исследовательская часть

Влияние напряжения на модуль упругости слоя асфальтогранулята. Способность слоя дорожной одежды воспринимать внешнюю нагрузку при движении транспортных средств характеризуется модулем упругости, величина которого зависит от свойств уплотняемого материала и конструктивных параметров слоя. В общем виде модуль упругости слоя асфальтогранулята можно представить в виде выражения:

$$E_y = f(\sigma; h, \text{фракция}), \text{ МПа} \quad (1)$$

где σ – напряжение в зоне контакта вальца катка с поверхностью слоя, МПа; h – толщина слоя, м; размер фракции асфальтогранулята, мм.

По результатам испытания разных фракций переработанного асфальтогранулята установлены зависимости модуля упругости от действующей нагрузки, толщины слоя и размера фракций, которые представлены на рис. 1

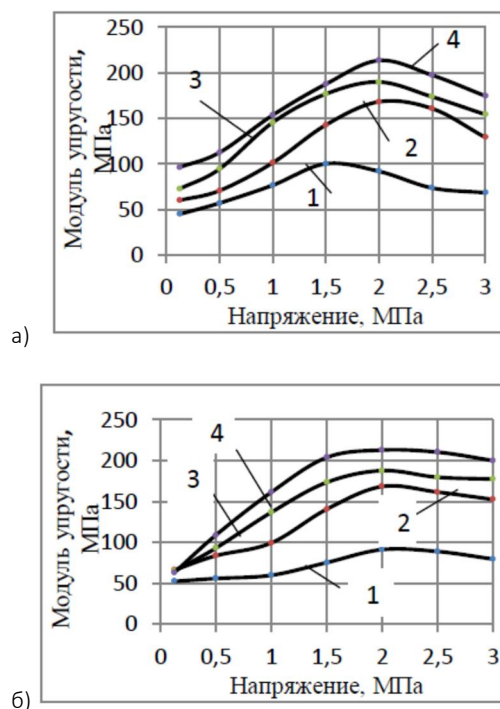


Рисунок 1 – Влияние напряжения при уплотнении на модуль упругости слоя асфальтогранулята: а - 5-10 мм; б - 10-20мм (начало)

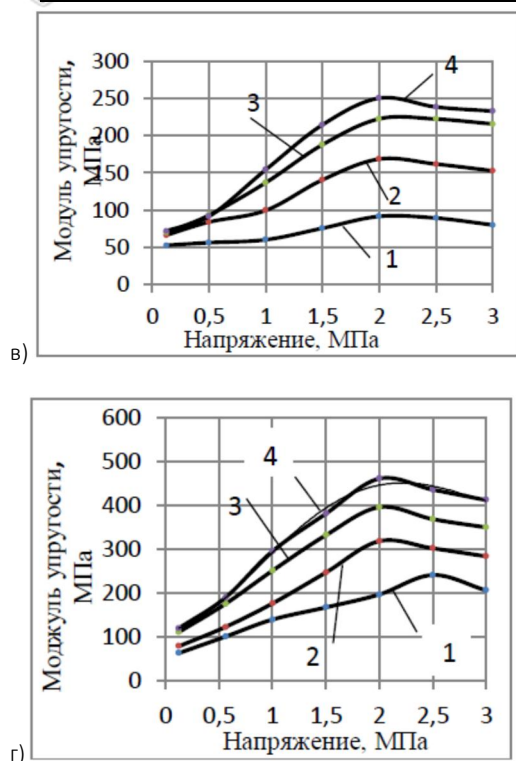


Рисунок 1 – Влияние напряжения при уплотнении на модуль упругости слоя асфальтогранулята:
г – 20-40 мм; 1- толщина слоя 0,05м; 2-0,10м;
3-0,15 м; 4-0,2м

Из представленных данных на рис. 1 видно, что модуль упругости слоя переработанного асфальтогранулята зависит от размера фракции и, если для слоев фракций 5/10, 10/20 и 5/20 мм модуль упругости принимает значения 213-250 МПа, то при устройстве слоя фракцией 20/40 мм модуль упругости равен 460 МПа. Такое различие в модулях упругости объясняется каркасной структурой формирования слоя. Численное значение модуля упругости с учетом размера фракции и толщины слоя переработанного асфальтогранулята от напряжения представлено в табл. 1.

На основании установленных значений модуля упругости слоя можно рассматривать практические области применения переработанного асфальтогранулята с учетом размера фракции и толщины слоя при укладке. Анализ представленных зависимостей модуля упругости слоя от напряжения позволяет сделать вывод, что для каждой фракции независимо от толщины можно установить общую зависимость модуля упругости от действующей нагрузки на уплотняемый слой.

С целью получения общей зависимости модуля упругости от действующего напряжения представим данные на рис. 1 в относительных величинах, принимая модуль упругости каждого слоя фракции при напряжении 1,0 МПа за единицу. Обозначим данную величину коэффициентом влияния напряже-

ния на модуль упругости слоя (K_σ). Влияние напряжения на безразмерный коэффициент K_σ представлено на рис. 2.

Таблица 1 – Влияние напряжения на модуль упругости слоя

Фракция, мм	Модуль упругости, МПа
5-10	$E_{y0,05} = 19,64\sigma^4 - 129,3\sigma^3 + 263,8\sigma^2 - 164,4\sigma + 87,77$
	$E_{y0,10} = 11,92\sigma^4 - 100,3\sigma^3 + 251,0\sigma^2 - 163,1\sigma + 101,1$
	$E_{y0,15} = 8,3\sigma^4 - 54,52\sigma^3 + 80,83\sigma^2 + 58,22\sigma + 51,47$
	$E_{y0,2} = 12,24\sigma^4 - 92,88\sigma^3 + 205,6\sigma^2 - 91,64\sigma + 118,0$
10-20	$E_{y0,05} = 2,27\sigma^4 - 8,06\sigma^3 - 16,42\sigma^2 + 78,69\sigma + 32,51$
	$E_{y0,10} = 8,32\sigma^4 - 44,95\sigma^3 + 42,6\sigma^2 + 83,61\sigma + 51,68$
	$E_{y0,15} = 11,45\sigma^4 - 65,4\sigma^3 + 82,29\sigma^2 + 52,71\sigma + 74,06$
	$E_{y0,20} = 5,66\sigma^4 - 29,02\sigma^3 + 18,11\sigma^2 + 83,21\sigma + 91,92$
5-20	$E_{y0,05} = -0,26\sigma^4 - 7,22\sigma^3 + 32,66\sigma^2 - 17,88\sigma + 54,7$
	$E_{y0,10} = 4,16\sigma^4 - 39,19\sigma^3 + 97,86\sigma^2 - 26,19\sigma + 69,84$
	$E_{y0,15} = 10,59\sigma^4 - 68,42\sigma^3 + 117,04\sigma^2 + 17,28\sigma + 61,25$
	$E_{y0,20} = 6,86\sigma^4 - 41,8\sigma^3 + 46,23\sigma^2 + 102,54\sigma + 49,3$
20-40	$E_{y0,05} = -17,65\sigma^4 + 97,75\sigma^3 - 180,2\sigma^2 + 193,5\sigma + 39,14$
	$E_{y0,1} = 9,486\sigma^4 - 84,62\sigma^3 + 198,7\sigma^2 - 23,99\sigma + 80,25$
	$E_{y0,15} = 17,44\sigma^4 - 128,5\sigma^3 + 253,5\sigma^2 + 3,12\sigma + 108,0$
	$E_{y0,2} = 20,25\sigma^4 - 149,8\sigma^3 + 297,2\sigma^2 + 8,18\sigma + 114,3$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений находится в пределах 0,98-0,99.

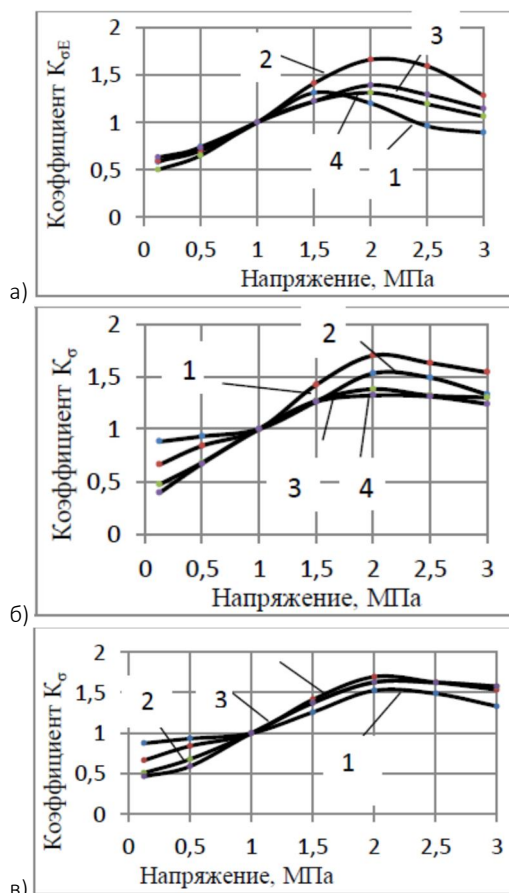


Рисунок 2 – Зависимость относительных коэффициентов K_σ от напряжения:

а – фракция 5/10 мм; б – 10/20 мм; в – 5/20 мм

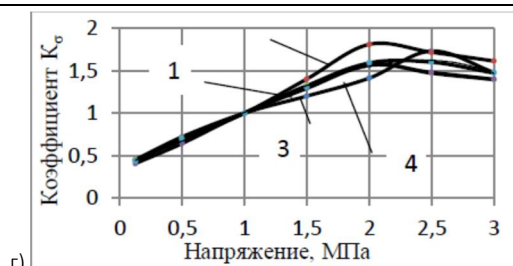


Рисунок 2 – Зависимость относительных коэффициентов K_{σ} от напряжения:
г – 20/40 мм; 1- толщина слоя 0,05м;
2-0,10м; 3-0,15 м; 4-0,2м

Из представленных данных на рис. 2 видно, что для каждой фракции асфальтогранулята независимо от толщины слоя имеется общая закономерность влияния напряжения на коэффициент K_{σ} . На рис. 3 представлены зависимости коэффициентов K_{σ} от напряжения для рассматриваемых фракций.

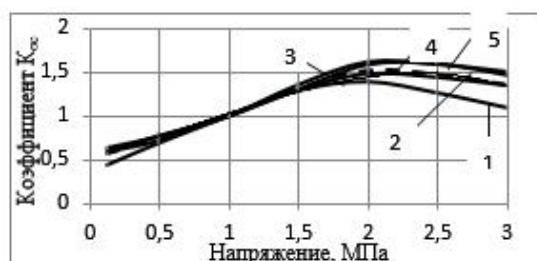


Рисунок 3 – Зависимости коэффициентов K_{σ} от напряжения с учетом размера фракции асфальтогранулята: 1 – фракция 5/10 мм; 2 – 10/20 мм; 3 – 5/20 мм; 4 – 20/40 мм; 5 – общая

Численное значение общих коэффициентов для фракций K_{σ} определяются по формулам, представленным в табл. 2.

Таблица 2 – Численное значение коэффициентов K_{σ} от напряжения с учетом размера фракции асфальтогранулята

Размер фракции, мм	Зависимость K_{σ}
5/10	$-0,0784\sigma^3 + 0,1478\sigma^2 + 0,4521\sigma + 0,4966$
10/20	$-0,0753\sigma^3 + 0,1896\sigma^2 + 0,3717\sigma + 0,5485$
5/20	$-0,1213\sigma^3 + 0,4157\sigma^2 + 0,1413\sigma + 0,599$
20/40	$-0,0982\sigma^3 + 0,2625\sigma^2 + 0,46\sigma + 0,3712$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений 0,98-0,99.

Из представленных на рис. 3 видно, что слои асфальтогранулята, независимо от размера фракций, имеют общую закономерность влияния напряжения на развитие упругой деформации при воздействии нагрузки. Общая зависимость коэффициента K_{σ} для асфальтогранулята независимо от размера фракции определяется по формуле:

$$K_{\sigma \text{общ}} = -0,0913\sigma^3 + 0,2446\sigma^2 + 0,3655\sigma + 0,5053, \quad (2)$$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений 0,99.

Величина модуля упругости слоя зависит от толщины слоя материала. Для установления зависимости влияния толщины слоя асфальтогранулята на модуль упругости принимаем значение модуля упругости слоя каждой фракции при напряжении 1,0 МПа и толщине слоя 0,05 м за единицу. Обозначим влияние толщины слоя на модуль упругости через коэффициент K_h . Влияние толщины слоя при действии уплотняющей нагрузки с учетом размера фракции представлено на рис. 4.

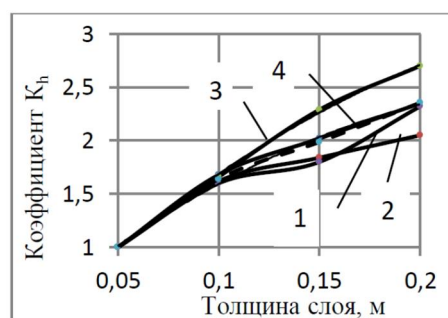


Рисунок 4 – Влияние толщины слоя на коэффициент K_h : 1- фракция 5/10 мм; 2-10/20 мм; 3- 5/20 мм; 4-20/40мм

Из представленных на рис. 4 данных видно, что с увеличением толщины слоя от 0,05 до 0,1 м все фракции асфальтогранулята описываются общей зависимостью. При дальнейшем увеличении толщины слоя в процессе уплотнения, за счет развития упруго-пластических деформаций в слое его толщина влияет на коэффициент K_h .

Зависимости для определения коэффициента K_h для слоев с разными фракциями асфальтогранулята, представлены в табл. 3.

Таблица 3 – Зависимость коэффициента K_h от толщины слоя асфальтогранулята.

Размер фракции, мм	Зависимость K_h
5/10	$-8h^2 + 10,32h + 0,54$
10/20	$-41h^2 + 16,99h + 0,272$
5/20	$-25h^2 + 17,71h + 0,167$
20/40	$-35h^2 + 17,53h + 0,227$

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений 0,97-0,99.

Анализ зависимостей влияния толщины слоя на коэффициент K_h , представленных в табл. 3 показал, что имеется общая закономерность, независимо от размера фракции, которую можно представить уравнением:

$$K_{h \text{общ}} = -27,25h^2 + 15,638h + 0,3019, \quad (3)$$

безразмерная величина

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,99.

С учетом установленных зависимостей влияния напряжения и толщины на модуль упругости



слоя, представленных в табл. 2 и 3, значение модуля упругости для фракции переработанного асфальтогранулята определяется по зависимостям, приведенным в табл. 4.

Таблица 4 - Зависимости для расчета модуля упругости слоя асфальтогранулята

Фракция, мм	Зависимость E_y для фракции
5/10	$E_{y5/10} = 76,4K_{\sigma\phi 5/10}K_{h5/10}$
5/20	$E_{y5/20} = 59,52 K_{\sigma\phi 5/20}K_{h5/20}$
10/20	$E_{y5/10} = 59,54K_{\sigma\phi 10/20}K_{h10/20}$
20/40	$E_{y20/40} = 138,89K_{\sigma\phi 20/40}K_{h20/40}$

где σ - напряжение, МПа; h - толщина слоя, м.

Анализ установленных закономерностей влияния напряжения и толщины на модуль упругости слоя для разных фракций асфальтогранулята показал, что размер фракции влияет на модуль упругости слоя при уплотнении. Для установления влияния размера фракции на модуль упругости представим значения модулей упругости для разных фракций в относительных значениях, принимая модуль упругости слоя фракции 5/10 мм при толщине 0,05 м и напряжении 1,0 МПа за единицу. Обозначим принятую величину коэффициентом влияния размера фракции асфальтогранулята на модуль упругости слоя K_ϕ . Численное значение коэффициента K_ϕ определяется по формуле:

$$K_\phi = 0,137N^3 - 0,71N^2 + 0,953N + 0,62, \quad \text{безразмерная величина} \quad (4)$$

где 1 - фракция 5/10 мм; 2 - 10/20 мм; 3 - 5/20 мм; 4 - 20/40 мм; N - номер фракции. Коэффициент корреляции равен 1,0.

С учетом полученных зависимостей влияния напряжения (1) и толщины слоя (2) на модуль упругости слоя общая зависимость для расчета модуля упругости слоя имеет вид:

$$E_y = 76,4K_\phi K_\sigma K_h, \text{ МПа.} \quad (5)$$

С учетом требований ГОСТ Р 71404 к минимальному требуемому модулю упругости нежесткой дорожной одежды установлены области применения переработанного асфальтогранулята для устройства дорожной одежды:

- асфальтогранулят фракции 20/40 мм - для дорог 3 категории, а также при устройстве щебеночных слоев способом заклинки;
- асфальтогранулят фракций 5/20 и 20/40 мм - для устройства дорожной одежды капитального типа 4 категории;
- асфальтогранулят фракций 5/20 мм - для устройства дорожной одежды облегченного типа;
- асфальтогранулят всех фракций - для устройства дорожной одежды переходного типа.

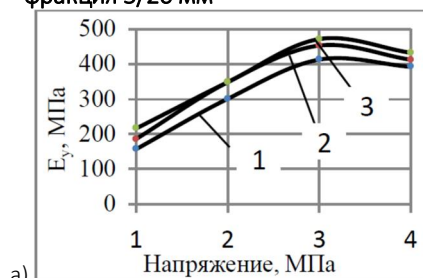
Влияние битумной эмульсии на модуль упругости слоя асфальтогранулобетона. Прочностные характеристики слоя дорожной одежды оцениваются модулем упругости, который зависит от свойств

применяемого материала, конструктивных параметров дорожной одежды и технологии устройства. При укреплении обочин интенсивность движения транспортных средств незначительна и можно полагать, что модуль упругости будет зависеть от воздействующей нагрузки на конструкцию слоя обочины, толщины слоя и свойств применяемого материала. В общем виде зависимость модуля деформации от отмеченных факторов можно представить в виде функции, МПа:

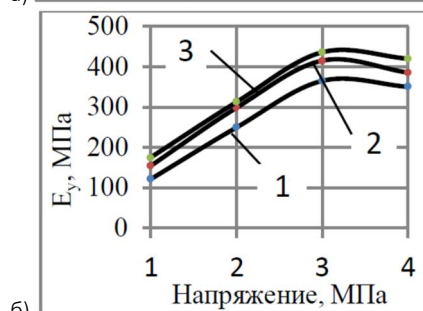
$$E_y = f(\sigma; h; \varepsilon; N), \quad (6)$$

где σ - напряжение в зоне контакта шины с поверхностью слоя, МПа; h - толщина слоя, м; ε - содержание эмульсии в смеси, %; N - размер фракции.

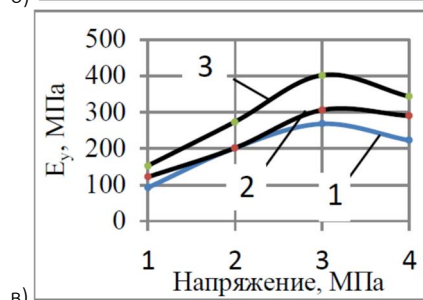
- фракция 5/20 мм



а)

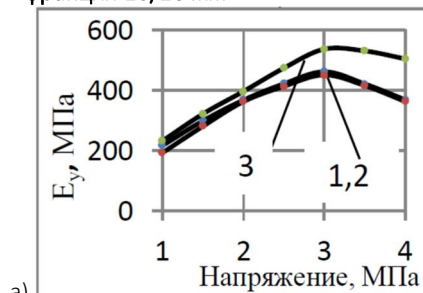


б)



в)

- фракция 10/20 мм



а)

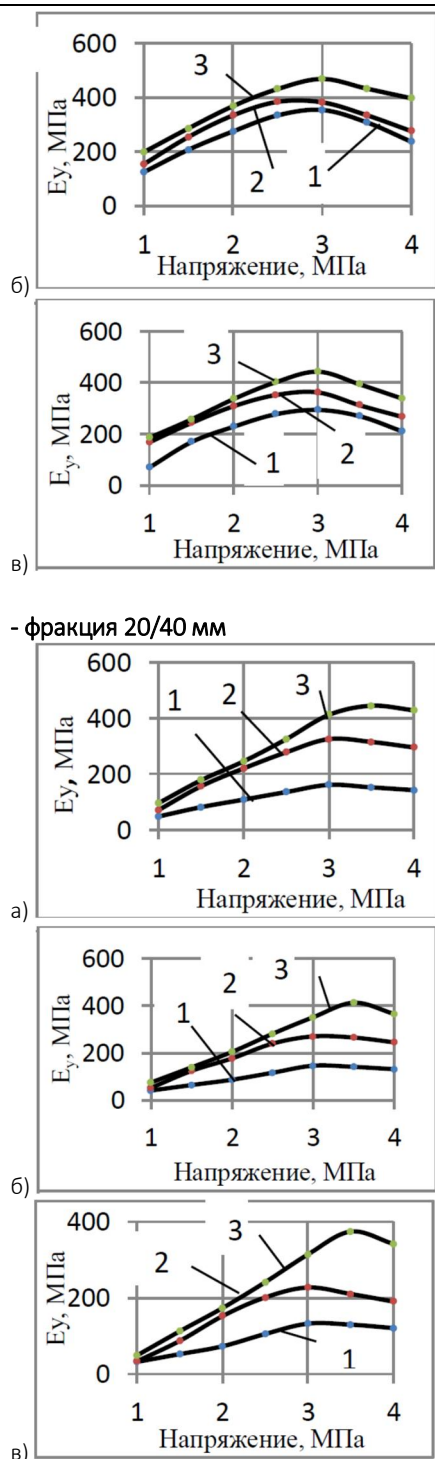


Рисунок 5 – Зависимость модуля упругости от напряжения при содержании эмульсии: а - 2%; б - 4%; в - 6%; 1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м

Доказано, что под воздействием нагрузки на уплотняемый слой материала возникает деформация, способствующая повышению плотности и как следствие, повышению прочности и модуля упругости. Зависимость модуля упругости от действия нагрузки представлена на рис. 5.

Численное значение модуля упругости от действующей нагрузки определяется по формулам, представленных в табл. 5.

Таблица 5 - Зависимости для расчета модуля упругости слоя $E=f(\sigma)$, МПа

Фракция, мм	Толщина слоя, м	При содержании эмульсии 2%	При содержании эмульсии 4%	При содержании эмульсии 6%
5/20	0,05	$-47.8\sigma^2 + 314.3\sigma - 55.35$	$-38.3\sigma^2 + 277.5\sigma - 70.23$	$-45\sigma^2 + 295.1\sigma - 107.4$
	0,1	$-50.7\sigma^2 + 332\sigma - 99.97$	$-43.5\sigma^2 + 298.3\sigma - 106.65$	$-24.1\sigma^2 + 181.4\sigma - 43.31$
	0,15	$-41.1\sigma^2 + 287.1\sigma - 94.4$	$-35.72\sigma^2 + 258.9\sigma - 107.8$	$-38.79\sigma^2 + 258.9\sigma - 112.1$
10/20	0,05	$-59.4\sigma^2 + 353.74\sigma - 88.91$	$-67.4\sigma^2 + 381.2\sigma - 201.3$	$-60.8\sigma^2 + 353.28\sigma - 225.6$
	0,1	$-62.65\sigma^2 + 375.3\sigma - 130.2$	$-73.1\sigma^2 + 406.38\sigma - 183.3$	$-59.3\sigma^2 + 331.5\sigma - 111.1$
	0,15	$-48.2\sigma^2 + 338.98\sigma - 70.63$	$-59.83\sigma^2 + 369.9\sigma - 121.8$	$-63.2\sigma^2 + 375.7\sigma - 144.58$
20/40	0,05	$-18.96\sigma^2 + 128.9\sigma - 66.18$	$-14.47\sigma^2 + 106.89\sigma - 58.4$	$-13\sigma^2 + 99.44\sigma - 61.89$
	0,1	$-43.62\sigma^2 + 296.2\sigma - 186.8$	$-38.87\sigma^2 + 262.4\sigma - 177.7$	$-39.24\sigma^2 + 252.7\sigma - 189.9$
	0,15	$-31\sigma^2 + 276.2\sigma - 161.4$	$-28.3\sigma^2 + 253.5\sigma - 166.4$	$-22.5\sigma^2 + 222.8\sigma - 166.2$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений находится в пределах 0,94-0,97.

Для получения общей зависимости модуля упругости от напряжения представим данные на рис. 5 в относительных значениях, принимая модуль упругости для всех фракций при напряжении 1,0 МПа, за единицу.

В качестве примера на рис. 6 представлены значения модуля упругости в относительных значениях для фракций 5/20 мм, 10/20 мм и 20/40 мм с учетом толщины слоя и разным содержанием битумной эмульсии в смеси.

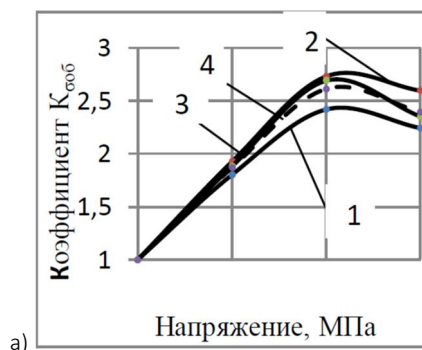


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента влияния напряжения на модуль упругости слоя асфальтогранулята: а – фракция 5/20 мм при содержании 4% битумной эмульсии

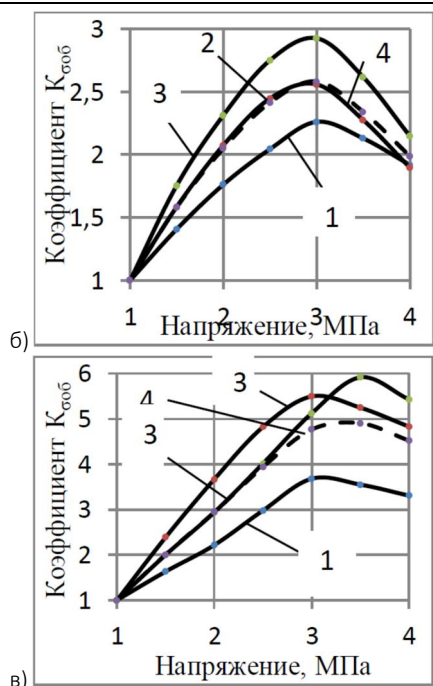


Рисунок 6 – Зависимость коэффициента влияния напряжения на модуль упругости слоя асфальтогранулята: б – фракция 10/20 мм при содержании 6% битумной эмульсии в смеси; в – фракция 20/40 мм при содержании 2% битумной эмульсии в смеси; 1 – толщина слоя 0,05м; 2 – 0,1 м; 3 – 0,15 м; 4 – общая для фракции

В табл. 6 представлены зависимости для расчета относительного коэффициента жесткости слоя для рассматриваемых смесей асфальтогранулобетонной смеси.

Таблица 6 - Зависимости для расчета относительного коэффициента K_E от напряжения $K_E=f(\sigma)$

Фракция, мм	Толщина слоя, м	При содержании эмульсии 2%	При содержании эмульсии 4%	При содержании эмульсии 6%
5/20	0,05	$-0.26\sigma^2+1.83\sigma-0.6$	$-0.29\sigma^2+2.13\sigma-0.89$	$-0.42\sigma^2+2.6\sigma-1.22$
	0,1	$-0.24\sigma^2+1.66\sigma-0.44$	$-0.27\sigma^2+1.88\sigma-0.66$	$-0.2\sigma^2+1.5\sigma-0.36$
	0,15	$-0.2\sigma^2+1.35\sigma-0.19$	$-0.22\sigma^2+1.58\sigma-0.4$	$-0.3\sigma^2+2.01\sigma-0.76$
10/20	0,05	$-0.27\sigma^2+1.63\sigma-0.41$	$-0.54\sigma^2+3.06\sigma-1.61$	$-0.87\sigma^2+5.09\sigma-3.25$
	0,10	$-0.33\sigma^2+1.95\sigma-0.68$	$-0.47\sigma^2+2.63\sigma-1.19$	$-0.35\sigma^2+1.97\sigma-0.66$
	0,15	$-0.21\sigma^2+1.46\sigma-0.3$	$-0.3\sigma^2+1.86\sigma-0.61$	$-0.34\sigma^2+2.02\sigma-0.78$
20/40	0,05	$-0.39\sigma^2+2.67\sigma-1.37$	$-0.61\sigma^2+4.15\sigma-2.62$	$-0.32\sigma^2+2.87\sigma-1.68$
	0,10	$-0.38\sigma^2+2.79\sigma-1.57$	$-0.84\sigma^2+5.56\sigma-3.89$	$-0.39\sigma^2+3.59\sigma-2.41$
	0,15	$-0.41\sigma^2+3.1\sigma-1.93$	$-1.17\sigma^2+7.52\sigma-5.65$	$-0.46\sigma^2+4.54\sigma-3.34$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,95-0,99.

Из представленных в табл. 6 зависимостей видно, что изменение модуля упругости под действием напряжения характеризуется общей закономерностью, что позволяет определить общую зависимость влияния напряжения на слой смеси с учетом его толщины при разном содержании битумной эмульсии.

На рис. 7 представлены зависимости влияния напряжения на коэффициент $K_{Есл}$ слоя смеси с учетом размера фракции асфальтогранулята и содержания битумной эмульсии в смеси.

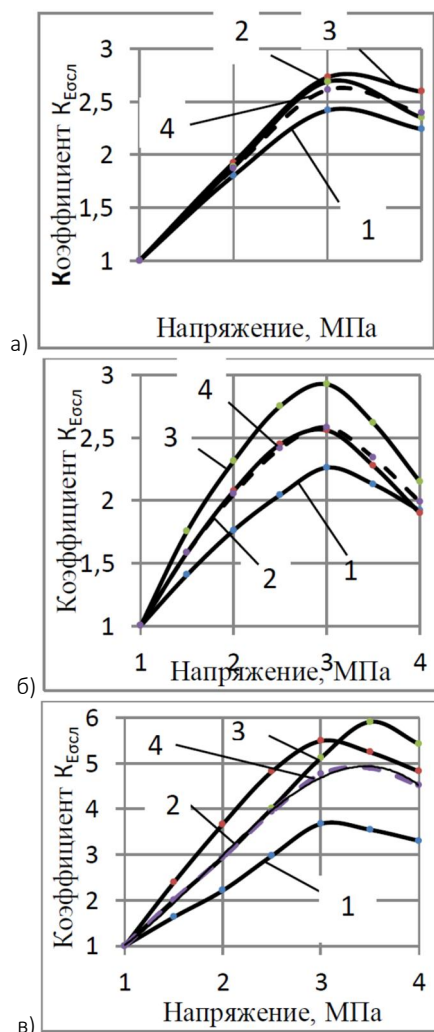


Рисунок 7 – Влияние напряжения на относительный коэффициент $K_{Есл}$ для слоя фракции с учетом содержания битумной эмульсии: а - фракция 5/20 мм; б - 10/20 мм; 3 - 20/40 мм; 1-содержание битумной эмульсии в слое смеси 2%; 2- 4%; 3-6%, 4- общая для фракции

Из представленных на рис. 7 данных видно, что размер фракции асфальтогранулята в смеси влияет на относительный коэффициент $K_{Есл}$, что можно объяснить формированием структуры слоя смеси в процессе уплотнения. Численные значения относительного коэффициента $K_{Есл}$ для слоя смеси с учетом размера фракции асфальтогранулята и содержания битумной эмульсии в смеси представлены в табл. 7.

Таблица 7 - Влияние напряжения на относительную величину коэффициента $K_{E_{осл}}$ для слоя смеси

Фракция, мм	При содержании эмульсии 2%	При содержании эмульсии 4%	При содержании эмульсии 6%
5/20	$K_{E_{осл}} = -0.24\sigma^2 + 1.66\sigma - 0.44$	$K_{E_{осл}} = -0.27\sigma^2 + 1.88\sigma - 0.66$	$K_{E_{осл}} = -0.3\sigma^2 + 2.01\sigma - 0.76$
10/20	$K_{E_{осл}} = -0.27\sigma^2 + 1.68\sigma - 0.46$	$K_{E_{осл}} = -0.44\sigma^2 + 2.52\sigma - 1.14$	$K_{E_{осл}} = -0.52\sigma^2 + 3.03\sigma - 1.56$
20/40	$K_{E_{осл}} = -0.38\sigma^2 + 2.79\sigma - 1.58$	$K_{E_{осл}} = -0.84\sigma^2 + 5.56\sigma - 3.89$	$K_{E_{осл}} = -0.39\sigma^2 + 3.59\sigma - 2.41$

где: σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,95-0,99.

Из представленных данных на рис. 7 видно, что имеется общая закономерность влияния напряжения на относительный коэффициент $K_{E_{осл}}$ для фракции смеси независимо от содержания битумной эмульсии. Численное значение коэффициентов $K_{E_{осл}}$, с учетом размера фракции смеси, определяется по формулам:

$$K_{E_{осл}} = -0.27\sigma^2 + 1.85\sigma - 0.62, \quad \text{фракция 5/20 мм} \quad (7)$$

$$K_{E_{осл}} = -0.41\sigma^2 + 2.41\sigma - 1.05, \quad \text{фракция 10/20 мм} \quad (8)$$

$$K_{E_{осл}} = -0.266\sigma^3 + 1.464\sigma^2 - 0.554\sigma + 0.377, \quad \text{фракция 20/40 мм} \quad (9)$$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,99.

С изменением толщины слоя при устройстве дорожной одежды меняется деформативная способность уплотняемого слоя, что оказывает влияние на его модуль упругости. С целью установления влияния толщины слоя на модуль упругости принимаем значение модуля упругости для каждой фракции смеси при толщине слоя 0,05 м напряжении 1,0 МПа за единицу. Обозначим данную относительную величину через коэффициент K_h , который оказывает влияние на модуль упругости слоя. Зависимости для расчета коэффициентов K_h для разных фракций, с учетом содержания битумной эмульсии в смеси представлены в табл. 8.

Таблица 8 - Влияние толщины слоя на модуль упругости (K_h)

Фракция, мм	При содержании эмульсии 2%	При содержании эмульсии 4%	При содержании эмульсии 6%
5/20	$4h^2 + 3h + 0.84$	$-20h^2 + 8.4h + 0.63$	$6h^2 + 5.5h + 0.71$
10/20	$58h^2 - 10.9h + 1.4$	$22h^2 + 1.5h + 0.87$	$-230h^2 + 62.7h - 1.56$
20/40	$8h^2 + 8.4h + 0.56$	$58h^2 + 3.3h + 1.02$	$6h^2 + 5.5h + 0.71$

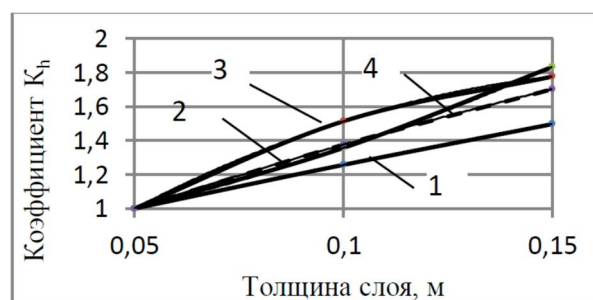
где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 1,0.

С учетом установленных зависимостей относительных коэффициентов $K_{E_{осл}}$ и K_h модуль упругости слоя асфальтогранулобетонной смеси с учетом содержания битумной эмульсии в смеси определяется по формулам, представленным в табл. 9.

Таблица 9 - Зависимости для расчета модуля упругости слоя

Фракция, мм	2%	4%	6%
5/20	$E_y = 156.7K_{E_{осл}}K_h$, МПа	$E_y = 121.3K_{E_{осл}}K_h$, МПа	$E_y = 23.5K_{E_{осл}}K_h$, МПа
10/20	$E_y = 216.4K_{E_{осл}}K_h$, МПа	$E_y = 124.7K_{E_{осл}}K_h$, МПа	$E_y = 69.44K_{E_{осл}}K_h$, МПа
20/40	$E_y = 48.17K_{E_{осл}}K_h$, МПа	$E_y = 41.12K_{E_{осл}}K_h$, МПа	$E_y = 32.05K_{E_{осл}}K_h$, МПа

Из представленных в табл. 9 зависимостей видно, что коэффициент K_h характеризуется общей закономерностью, не зависящей от содержания битумной эмульсии в смеси (рис. 8).

Рисунок 8 – Влияние толщины слоя смеси на величину коэффициента K_h : 1 – фракция 5/20мм; 2 – 10/20мм; 3 – 20/40 мм; 4 – общая для смесей

Численное значение коэффициентов K_h для фракций определяется по формулам:

$$\text{фракция 5/20 мм: } K_h = -3.33h^2 + 5.63h + 0.73, \quad (10)$$

$$\text{фракция 10/20 мм: } K_h = -50h^2 + 17.77h + 1.02, \quad (11)$$

$$\text{фракция 20/40 мм: } K_h = 24h^2 + 3.53h + 0.76, \quad (12)$$

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 1,0.

Из представленных на рис. 8 зависимостей видно, что с увеличением толщины слоя при устройстве дорожной одежды с применением асфальтогранулобетонных смесей модуль упругости слоя возрастает. В зависимости от размера фракции асфальтогранулята модуль упругости слоя повышается от 50



до 80%. Общая зависимость влияния толщины на модуль упругости слоя определяется по формуле:

$$K_h = -9,78h^2 + 8,98h + 0,57, \quad (13)$$

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнений равен 1,0

Изменение содержания битумной эмульсии в смеси влияет не только на ее характеристики, но и на прочность уплотняемого слоя. С целью уточнения влияния содержания эмульсии в смеси на модуль упругости слоя представим данные на рис. 8 в относительных значениях, принимая модуль упругости для слоя с содержанием битумной эмульсии 2% и толщине слоя 0,05 м, за единицу. Обозначим принятую величину через безразмерный коэффициент $K_{ЕЭ}$, характеризующий влияние содержания битумной эмульсии в смеси на модуль упругости уплотняемого слоя. На рис. 9 представлены зависимости коэффициентов $K_{ЕЭ}$ для слоев смеси разных фракций.

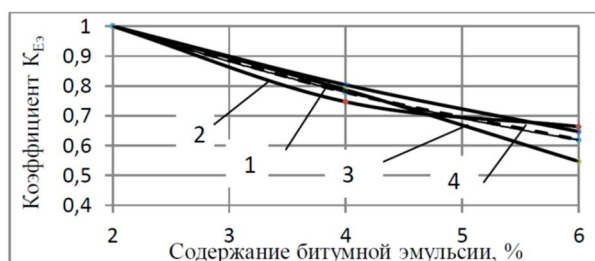


Рис. 9. Влияние содержания эмульсии в смеси на модуль упругости слоя: 1 - фракция 5/20 мм; 2 - 10/20 мм; 3 - 20/40; 4 - общая для смеси

Из представленных на рис. 9 данных видно, что независимо от размера фракций асфальтогранулята в смеси коэффициент $K_{ЕЭ}$ снижается с увеличением содержания битумной эмульсии в смеси. Значительное понижение коэффициента $K_{ЕЭ}$ происходит для смеси фракцией 5/20 мм. Численное значение коэффициентов $K_{ЕЭ}$ для фракций определяется по формулам:

$$\text{фракция 5/20 мм: } K_{ЕЭ} = 0,005\varepsilon^2 - 0,128\varepsilon + 1,237, \quad (14)$$

$$\text{фракция 10/20 мм: } K_{ЕЭ} = 0,02\varepsilon^2 - 0,25\varepsilon + 1,42, \quad (15)$$

$$\begin{array}{ll} \text{фракция} & 20/40 \text{ мм:} \\ K_{ЕЭ} = -0,003\varepsilon^2 - 0,086\varepsilon + 1,186, & (16) \end{array}$$

где ε – содержание битумной эмульсии в смеси, %. Коэффициент корреляции равен 1,0

С учетом установленных значений влияния напряжения, толщины слоя и содержания битумной эмульсии в смеси модуль упругости слоя для фракций определяется по формулам, МПа:

$$\text{фракция 5/20 мм: } E_y = 156,7K_{ЕЭ}K_hK_{ЕЭ}, \quad (17)$$

$$\text{фракция 10/20 мм: } E_y = 216,4K_{ЕЭ}K_hK_{ЕЭ}, \quad (18)$$

$$\text{фракция 20/40 мм: } E_y = 48,1K_{ЕЭ}K_hK_{ЕЭ}. \quad (19)$$

Согласно ГОСТ Р 70197.1 и ГОСТ Р 71404 асфальтогранулобетонные смеси с вяжущим из битумной эмульсии можно использовать при устройстве основания для дорог 1-3 категорий для покрытий нежесткого типа, а также для оснований и покрытий автомобильных дорог 4 категории облегченного и переходного типов.

На основании полученных результатов исследования влияния переработанного асфальтогранулята, применяемого для устройства дорожных конструкций с разной толщиной слоя при укладке, можно сделать следующие **выводы**.

1. Применение асфальтогранулята для дорожного строительства позволяет уменьшить потребность в щебне, что влияет на стоимость работ. Результаты испытания асфальтогранулята показали, что асфальтогранулобетон с переработанными фракциями асфальтогранулята соответствует требованиям нормативных документов к материалу для устройства дорожных одежд. Пределы прочности асфальтогранулобетона независимо от размера фракций асфальтогранулята соответствуют требованиям ГОСТ9128 для асфальтобетона.

2. Установлены области применения переработанного асфальтогранулята для устройства дорожной одежды:

- асфальтогранулят фракции 20/40 мм – для дорог 3 категории, а также при устройстве щебеночных слоев способом заклинки;
- асфальтогрануляты фракций 5/20 и 20/40 мм – для устройства дорожной одежды капитального для дорог 4 категории;
- асфальтогранулят фракций 5/20 – для устройства дорожной одежды облегченного типа;
- асфальтогранулят всех фракций – для устройства дорожной одежды переходного типа.

3. Введение битумной эмульсии при регенерации асфальтогранулята влияет на модуль упругости слоя и характеристики смеси независимо от толщины слоя и размера фракций. Регенерация асфальтогранулята битумной эмульсией позволяет использовать смеси при устройстве основания для дорог 1-3 категорий для покрытий нежесткого типа, а также для основания и покрытия автомобильных дорог 4 категории облегченного и переходного типов.

4. Получены аналитические зависимости для расчета модуля упругости слоя от уплотняющей нагрузки, конструктивных параметров слоя, размера фракций асфальтогранулята и содержания битумной эмульсии в смеси.

Библиографический список

1. ГОСТ Р 70197.1-2022. Смеси органоминеральные холодные с использованием вторичного асфальтобетона. Общие технические условия. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 августа 2022 г. № 718-ст



2. ГОСТ Р71404-2024. Дороги автомобильные общего пользования. Нежесткие дорожные одежды. Правила проектирования. Дата введения 2024-09-01.
3. Сенибабнов, С. А. Анализ нормативной документации по расчету прочностных характеристик дорожных одежд нежесткого типа по допускаемому упругому прогибу / С. А. Сенибабнов, К. А. Андрианов, А. Ф. Зубков // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2019. – № 1(53). – С. 28-43. – DOI 10.25987/VSTU.2019.53.1.003. – EDN ZABQBF.
4. Калгин, Ю. И. Органоминеральные смеси с асфальтогранулятом для капитального ремонта дорожных одежд / Ю. И. Калгин, Н. А. Барабась // Высокие технологии в строительном комплексе. – 2019. – № 1. – С. 42-48. – EDN JDGIEZ.
5. Устройство асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог с использованием асфальтогранулята / Д. Г. Игошкин, В. Е. Кошкарров, Д. Г. Неволин, А. В. Втюрин // Инновационный транспорт. – 2014. – № 1(11). – С. 35-41. – EDN RXGKML.
6. Паневин, М. Н. Органоминеральные смеси на основе асфальтогранулята для устройства покрытий и оснований автомобильных дорог / М. Н. Паневин, Ю. И. Калгин // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2016. – № 4(44). – С. 120-127. – EDN XCRHUZ.
7. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement / E. G. Pakhomova, K. Andrianov, A. Zubkov, P. Monastyrev // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18, No. 2. – P. 192-197. – DOI 10.5937/jaes18-26311. – EDN IWIIUA.
8. Senibabnov, S. A. Method of Development of Technology for the Device of Road Structures Using Asphalt Granulate / S. A. Senibabnov, K. A. Andrianov, A. F. Zubkov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2020. – No. 2(46). – P. 51-70. – EDN YCWFNT.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 11.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 11.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья

УДК 625 7/8

ГРНТИ: 67.13.69 Строительно-дорожные и путевые работы

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

doi:10.51608/26867818_2025_4_51

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДЕФОРМАТИВНУЮ СПОСОБНОСТЬ СЛОЯ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА

© Авторы, 2025
SPIN: 4118-5150

ЗУБКОВ Анатолий Федорович
доктор технических наук, профессор
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: afzubkov2013@yandex.ru)

SPIN: 1771-7181

АНДРИАНОВ Константин Анатольевич
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Городское строительство и автомобильные дороги»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: konst-68@yandex.ru)

SPIN: 8674-6046

МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, доцент,
директор института «Архитектура, строительство и транспорт»
РААСН; Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: monastyrev68@mail.ru)

SPIN: 1143-7510

МАМОНТОВ Александр Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: sansanich1409@yandex.ru)

SPIN: 8423-2539

МАМОНТОВ Семен Александрович
кандидат технических наук, доцент кафедры «Конструкции зданий и сооружений»
Тамбовский государственный технический университет
(Россия, Тамбов, e-mail: kardinal61@mail.ru)

SPIN: 8674-6046

ЕЗЕРСКИЙ Валерий Александрович
доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура и градостроительство»
Тамбовский государственный технический университет (Россия, Тамбов)

Аннотация. Безопасность дорожного движения зависит от состояния дорожного покрытия и обочин автомобильных дорог. Для укрепления обочин применяются отходы при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа. Достижение максимальной плотности уплотняемого материала возможно при условии обеспечения определенного соотношения между пределом прочности и напряжениями в зоне контакта рабочего органа уплотняющей машины. В статье представлены результаты исследования по влиянию технологических факторов при уплотнении на жесткость и деформацию слоя, влияющие на выбор параметров катков. Полученные зависимости могут быть использованы при моделировании технологических процессов устройства дорожных конструкций с требуемыми прочностными характеристиками.

Ключевые слова: асфальтогранулят; нагрузка; деформация; уплотнение; обочина; дорожное строительство

Для цитирования: Влияние технологических факторов на деформативную способность слоя асфальтогранулята / А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, П.В. Монастырёв, А.А. Мамонтов, С.А. Мамонтов, В.А. Езерский // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 51-58. doi:10.51608/26867818_2025_4_51.



Original article

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL FACTORS ON THE DEFORMABILITY OF THE ASPHALT GRANULATE LAYER

© The Author(s) 2025

ZUBKOV Anatoly Fedorovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

Tambov State Technical University (Russia, Tambov, e-mail: afzubkov2013@yandex.ru)

ANDRIANOV Konstantin Anatolyevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,

Head of the Department «Urban Construction and Roads»

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

MONASTYREV Pavel Vladislavovich

Corresponding Member of RAACS, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor,

Director of the Institute «Architecture, Construction and Transport»

RAACS; Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

MAMONTOV Alexander Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

MAMONTOV Semyon Alexandrovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

EZERSKY Valery Aleksandrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Urban Planning

Tambov State Technical University (Russia, Tambov)

Abstract. Road safety depends on the condition of the road surface and the sides of the roads. Waste from cold milling of non-rigid types of road surfaces is used to strengthen the roadsides. Achieving the maximum density of the compacted material is possible if a certain ratio between the ultimate tensile strength and the stresses in the contact zone of the compacting machine is maintained. The article presents the results of a study on the influence of technological factors during compaction on the stiffness and deformation of the layer, which affect the choice of roller parameters. The obtained dependencies can be used in modeling the technological processes of constructing road structures with the required strength characteristics.

Keywords: asphalt granulate; load; deformation; compaction; roadside; road construction

For citation: Influence of technological factors on the deformability of the asphalt granulate layer / A.F. Zubkov, K.A. Andrianov, P.V. Monastirev, A.A. Mamontov, S.A. Mamontov, V.A. Ezersky // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 51-58. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_51.

Введение. Изменение характеристик асфальтобетонных покрытий в процессе эксплуатации автомобильной дороги связано с изменением свойств битума, входящего состав асфальтобетона. При взаимодействии битумной пленки с воздухом возникают процессы окисления и полимеризации, влияющие на деформационные свойства битумных пленок, обеспечивающих сцепление частиц минеральных материалов асфальтобетона. Изменение свойств вяжущего способствует снижению транспортно-эксплуатационных параметров дорожных

покрытий и требует проведения капитального ремонта автомобильной дороги. В тоже время минеральные составляющие асфальтобетона не меняют свои характеристики в процессе эксплуатации автомобильной дороги, что позволяет после холодного фрезерования покрытия использовать получаемые отходы (асфальтогранулят) в дорожном строительстве. По результатам испытания переработанного асфальтогранулята установлено, что содержание битума в частицах разрушенного асфальтобетонного покрытия находится в пределах от 2 % до 4 %, что



представляет собой полноценный строительный материал, применение которого технически целесообразно и экономически оправдано [1-3]. Опыт зарубежных стран и дорожных организаций РФ показал, что получаемый материал при разрушении асфальтобетонных покрытий эффективно используется при ремонте и реконструкции автомобильных дорог как при укреплении обочин, так и при устройстве слоев дорожной одежды с применением методов регенерации. В результате фрезерования дорожного покрытия получают материал в виде гранул с поверхностной битумной пленкой, размеры которых зависят от технологических режимов работы фрезы. В зависимости от размера фракций асфальтогранулята характеристики получаемого материала (модуль деформации, коэффициенты жесткости и вязкости) различны, что влияет на области их применения [1]. Установление общих закономерностей влияния нагрузки и технологических параметров при использовании асфальтогранулята в дорожных конструкциях позволяет повысить эффективность их применения в дорожном строительстве.

Методика проведения испытания. При устройстве слоев дорожной одежды и при укреплении обочин автомобильных дорог материал распределяют слоем заданной толщиной с последующим его уплотнением катками. Под действием нагрузки от уплотняющей машины в зоне контакта вальца с поверхностью слоя возникают деформации, которые характеризуют процесс уплотнения [2-4]. Общая деформация слоя материала под действием нагрузки определяется выражением:

$$\lambda_{\text{общ}} = \lambda_{\text{упр}} + \lambda_{\text{ост}}, \text{ мм} \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{упр}}$ - упругая деформация, мм; $\lambda_{\text{ост}}$ - остаточная деформация, мм.

Для уточнения влияния нагрузки на развитие деформаций с учетом параметров слоя необходимо знать характеристики материала, которые определяются на основании экспериментальных исследований. Определение характеристик слоя асфальтогранулята выполнялось при действии нагрузки на образец с учетом толщины слоя и размера фракций.

Измерение деформации слоя смеси выполнялось на установке, позволяющей измерять деформацию слоя (полную, остаточную и упругую) индикатором часового типа с точностью до 0,01 мм при контролируемой нагрузке с использованием гидравлического пресса ПГ-500. Толщина уплотняемого слоя принималась 0,05; 0,10; 0,15 и 0,20 м. Для уточнения влияния размера фракций на характеристики слоя материал был разделен на фракции 5-10 мм, 10-20 мм, 5-20 мм и 20-40 мм. Испытание образцов проводилось на одноосное сжатие, соответствующее состоянию уложенной смеси в выбоину дорожного покрытия. При укладке материала осуществлялся контроль за толщиной слоя. Принятая методика прове-

дения испытания позволяет оценить характеристики асфальтогранулята при действии циклической нагрузки.

После укладки и предварительного уплотнения слоя на поверхность устанавливается металлический штамп. Верхнюю плиту пресса устанавливают выше уровня поверхности штампа на 1,5-2,0 мм. Для измерения деформации индикатор, прикрепленный к стойке, размещают таким образом, чтобы подвижная часть его ножки касалась верхней плиты пресса. После этого на образец через штамп прикладываются нагрузка. По заданной величине напряжения с помощью индикатора часового типа определяется деформация штампа. После замера полной деформации под нагрузкой на штамп нагрузка снимается и производится замер упругой деформации. Затем цикл повторяется. За конечный результат принимается среднее арифметическое значение испытаний трех образцов, округленное до второго десятичного знака.

Результаты экспериментального исследования. Результаты измерения деформаций слоя под действием нагрузки с учетом размера фракций представлены в табл. 1. За результат принималась величина, представляющая среднее арифметическое значение испытаний из трех образцов, округленное до второго десятичного знака. Расхождение между полученными результатами не превышало 10%.

Таблица 1 – Результаты измерения деформаций слоя

- фракция 5-10 мм

σ , МПа	Толщина 0,05 м			Толщина 0,10 м			Толщина 0,15 м			Толщина 0,2 м		
	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$
0,125	7,09	6,95	0,14	7,18	7,04	0,14	9,52	9,22	0,3	12,21	12,05	0,16
0,5	2,79	2,35	0,44	2,81	2,26	0,55	3,85	2,83	1,02	3,85	2,84	1,01
1	3,78	3,05	0,73	4,32	3,33	0,99	5,0	3,11	1,89	7,01	4,77	2,24
2	2,89	1,8	1,09	2,72	1,66	1,06	4,93	2,50	2,43	0,56	0,29	0,27
3,0	5,89	3,67	2,2	5,67	4,36	1,31	5,56	3,67	1,89	8,24	4,78	4,64

- фракции 10-20 мм

σ , МПа	Толщина 0,05 м			Толщина 0,10 м			Толщина 0,15 м			Толщина 0,2 м		
	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$
0,12	5,60	5,45	0,15	8,23	8,03	0,2	9,85	9,49	0,36	12,7	12,46	0,24
0,5	2,56	2,04	0,52	2,37	1,87	0,50	2,56	1,55	1,01	3,36	2,59	0,77
1	2,77	2,01	0,76	3,94	3,22	0,72	4,09	2,54	1,55	6,13	3,99	1,14
2	1,91	1,19	0,72	1,85	1,0	0,85	5,9	3,5	2,4	4,57	2,4	2,17
3,0	3,41	2,19	1,22	4,74	3,15	1,59	6,7	3,96	2,74	5,99	3,47	2,52

- фракция 5-20 мм

σ , МПа	Толщина 0,05 м			Толщина 0,10 м			Толщина 0,15 м			Толщина 0,2 м		
	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$	$\lambda_{\text{пол}}$	$\lambda_{\text{ост}}$	$\lambda_{\text{упр}}$
0,125	6,93	6,81	0,12	7,0	6,81	0,19	11,59	11,3	0,29	13,1	12,9	0,4
0,5	2,47	2,10	0,37	3,65	3,05	0,60	3,35	2,54	0,81	5,19	4,08	1,1
1	3,01	2,17	0,84	4,98	3,97	1,01	5,81	4,71	1,1	6,80	4,54	2,4
2	2,51	1,41	1,1	2,77	1,58	1,19	3,78	2,48	1,3	0,50	0,26	0,7
3,0	5,71	3,82	1,89	5,58	3,61	1,97	6,12	4,23	1,89	6,13	4,37	1,2



- фракция 20-40 мм

σ , МПа	Толщина 0,05 м			Толщина 0,10 м			Толщина 0,15 м			Толщина 0,2 м		
	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$
0,125	4,07	3,97	0,1	5,24	5,08	0,16	7,17	7	0,17	8,88	8,67	0,21
0,5	2,17	1,92	0,25	1,87	1,46	0,41	3,13	2,7	0,43	3,52	3,04	0,48
1	2,36	2	0,36	5,45	4,88	0,57	5,82	5,22	0,60	4,91	4,29	0,62
2	1,3	0,79	0,51	0,97	0,34	0,63	0,85	0,19	0,66	0,85	0,16	0,69
3,0	3,44	2,71	0,73	4,41	3,45	0,96	4,86	3,87	0,99	6,15	4,99	1,16

Полученные экспериментальные данные по деформациям (полной, упругой и остаточной) при действии нагрузки на слой асфальтогранулята позволяют установить закономерности изменения характеристик слоя в процессе уплотнения. Анализ полученных результатов показал, что деформации слоя асфальтогранулята зависят от действующей нагрузки на уплотняемый слой, размера частиц фракций и конструктивных параметров уплотняемого слоя [5-7]. На основании полученных результатов определены реологические характеристики асфальтогранулята с учетом действующей нагрузки, размера фракций и толщины слоя при укладке. В качестве примера в табл. 2 представлены реологические характеристики слоев асфальтогранулята при действии уплотняющей нагрузки с учетом размера фракции и толщины слоя.

Таблица 2 - Реологические характеристики слоя асфальтогранулята

- фракция 5-10, толщина слоя 0,05 м

σ , МПа	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$	$E_{деф.сум}$	$K_{ж}$	$K_{в}$
0,5	2,79	2,35	0,44	3,59	0,051	0,134
1	3,78	3,05	0,73	5,20	0,073	0,202
2	2,89	1,8	1,09	7,79	0,110	0,331
3	5,87	3,67	2,20	7,28	0,103	0,338

- фракция 10-20 мм, толщина слоя 0,1 м

σ , МПа	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$	E_y	$E_{деф.с-ля}$	$K_{ж}$	$K_{в}$
0,5	2,85	2,26	0,59	85,16	3,54	0,050	0,269
1	4,20	3,33	0,87	115,31	4,99	0,070	0,396
2	3,35	1,66	1,69	118,36	7,14	0,101	0,649
3	7,32	4,36	2,96	101,41	6,61	0,093	0,669

- фракция 5-20 мм, толщина слоя 0,15 м

σ , МПа	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$	E_y	$E_{деф}$	$K_{ж}$	$K_{в}$
0,5	3,35	2,54	0,81	92,59	2,38	0,033	0,273
1	5,81	4,71	1,1	136,36	3,42	0,048	0,405
2	4,08	2,48	1,6	187,50	5,03	0,071	0,649
3	6,77	4,23	2,54	177,17	5,50	0,077	0,777

- фракции 20-40 мм, толщина слоя 0,10 м.

σ , МПа	$\lambda_{пол}$	$\lambda_{ост}$	$\lambda_{упр}$	E_y	$E_{деф}$	$K_{ж}$	$K_{в}$
0,5	1,87	1,46	0,41	87,07	5,06	0,071	0,382
1	5,45	4,88	0,57	125,26	5,70	0,08	0,438
2	0,97	0,34	0,63	226,67	9,97	0,14	0,8361
3	4,41	3,45	0,96	223,12	9,91	0,139	0,854

Анализ результатов исследования. Влияние напряжения и толщины слоя при укладке на коэффициент жесткости слоя асфальтогранулята. Повышение плотности материала при проходах катка приводит к повышению сопротивляемости материала развитию деформации слоя под действием внешней нагрузки и для обеспечения более высокой плотности необходимо увеличивать нагрузку. Величиной, характеризующей свойства материала сопротивляться деформированию слоя под действием нагрузки, является коэффициент жесткости. Коэффициент жесткости характеризует необходимое усилие для обеспечения заданной деформации на единицу толщины слоя. Численное значение коэффициента жесткости определяется по формуле:

$$K_{ж} = \sigma_k / \lambda, \text{ МПа/мм} \quad (2)$$

где σ_k – напряжение, МПа; λ – полная деформация, мм.

На рис. 1 представлены зависимости коэффициента жесткости слоя от напряжения с учетом толщины слоя асфальтогранулята.

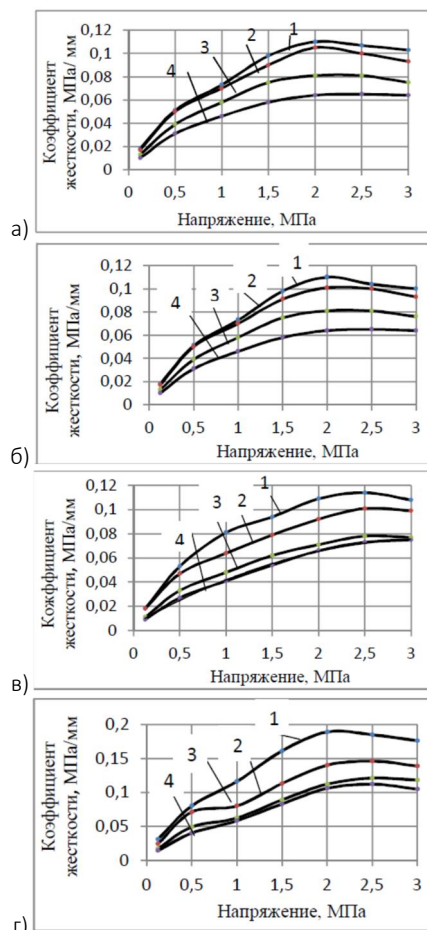


Рисунок 1 – Зависимость коэффициента жесткости асфальтогранулята от напряжения при разном гранулометрическом составе и толщине слоя:

а – фракция 5-10 мм; б-10-20 мм; в-5-20 мм; г-20-40 мм;
1 – толщина слоя 0,05 м; 2-0,10 м; 3 -0,15 м; 4 -0,2 м



Из представленных данных на рис. 1 видно, что независимо от размера фракций и толщины слоя при укладке имеются общие закономерности влияния напряжения на коэффициент жесткости слоя. С ростом напряжения в процессе уплотнения коэффициент жесткости возрастает, что объясняется повышением плотности слоя материала. Независимо от размера фракций переработанного асфальтогранулята с увеличением толщины слоя коэффициент жесткости слоя снижается. Увеличение размера фракции асфальтогранулята коэффициент жесткости возрастает, что связано с образованием каркасной структуры слоя. Численное значение коэффициента жесткости слоя от действия напряжения на уплотняемый слой, с учетом его толщины и размера фракций, представлено в табл. 3.

Таблица 3 - Зависимости для расчета коэффициента жесткости слоя переработанного асфальтогранулята с учетом фракции и толщины слоя при уплотнении

Фракция, мм	Толщина слоя, м	Зависимость для расчета коэффициента жесткости слоя: $K_{ж\sigma} = f(\sigma)$
5-10	0,05	$-0,0192\sigma^2 + 0,088\sigma + 0,0086$
	0,10	$-0,0178\sigma^2 + 0,081\sigma + 0,0094$
	0,15	$-0,0148\sigma^2 + 0,0672\sigma + 0,0065$
	0,20	$-0,0105\sigma^2 + 0,0504\sigma + 0,0058$
10-20	0,05	$-0,0172\sigma^2 + 0,0839\sigma + 0,0112$
	0,10	$-0,0111\sigma^2 + 0,0618\sigma + 0,0136$
	0,15	$-0,0092\sigma^2 + 0,0512\sigma + 0,0066$
	0,20	$-0,0068\sigma^2 + 0,044\sigma + 0,046$
5-20	0,05	$-0,0184\sigma^2 + 0,0863\sigma + 0,0089$
	0,10	$-0,015\sigma^2 + 0,0678\sigma + 0,0063$
	0,15	$-0,0092\sigma^2 + 0,0512\sigma + 0,0066$
	0,20	$-0,0105\sigma^2 + 0,0504\sigma + 0,058$
20-40	0,05	$-0,0292\sigma^2 + 0,1425\sigma + 0,0125$
	0,10	$-0,0165\sigma^2 + 0,0916\sigma + 0,0166$
	0,15	$-0,0117\sigma^2 + 0,0725\sigma + 0,0092$
	0,20	$-0,0132\sigma^2 + 0,0747\sigma + 0,0034$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений находится в пределах 0,97-0,99.

Из представленных на рис. 1 зависимостей видно, что в зависимости от размера фракции асфальтогранулята независимо от толщины слоя влияние напряжения на коэффициент жесткости слоя можно представить общим коэффициентом жесткости. Для установления общей зависимости коэффициента жесткости слоя асфальтогранулята для разных фракций, не зависимо от толщины, представим данные на рис.1 в относительных величинах, принимая, условно, коэффициент жесткости каждого слоя при напряжении 1,0 МПа за единицу ($K_{ж\sigma 1}$). На рис.2 представлены зависимости коэффициента жесткости слоя ($K_{о.ж}$) в относительных значениях с учетом толщины слоя при уплотнении.

Численное значение относительного коэффициента жесткости слоя от напряжения ($K_{ж\sigma}$) с учетом

размера фракции и толщины слоя, определяется по формулам, представленным в табл. 4.

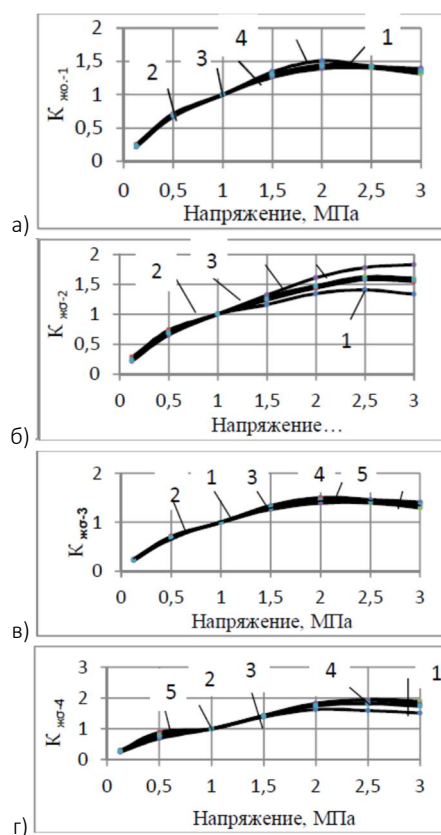


Рисунок 2 – Зависимость относительного коэффициента жесткости слоя разных фракций от напряжения при разной толщине слоя в относительных величинах: а – фракция 5-10 мм; б – 1-20 мм; в – 5-20 мм; г – 20-40 мм; 1 – толщина слоя 0,05м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – 0,20м; 5 – общая

Таблица 4 - Зависимости относительного коэффициента жесткости слоя при разной толщине слоя.

Фракция, мм	Толщина слоя, м	Зависимость для расчета коэффициента жесткости слоя $K_{ж\sigma} = f(\sigma)$
5-10	0,05	$-0,2623\sigma^2 + 1,1983\sigma + 0,1184$
	0,10	$-0,2496\sigma^2 + 1,1532\sigma + 0,124$
	0,15	$-0,2495\sigma^2 + 1,1522\sigma + 0,123$
	0,20	$-0,2277\sigma^2 + 1,0961\sigma + 0,1265$
10-20	0,05	$-0,213\sigma^2 + 1,0356\sigma + 0,1382$
	0,10	$-0,1729\sigma^2 + 0,9662\sigma + 0,2117$
	0,15	$-0,1922\sigma^2 + 1,0666\sigma + 0,1372$
	0,20	$-0,1656\sigma^2 + 1,073\sigma + 0,112$
5-20	0,05	$-0,2519\sigma^2 + 1,1815\sigma + 0,122$
	0,10	$-0,2603\sigma^2 + 1,1818\sigma + 0,1243$
	0,15	$-0,2596\sigma^2 + 1,1697\sigma + 0,1082$
	0,20	$-0,2277\sigma^2 + 1,0961\sigma + 0,1265$
20-40	0,05	$-0,2515\sigma^2 + 1,2287\sigma + 0,108$
	0,10	$-0,2068\sigma^2 + 1,1451\sigma + 0,2079$
	0,15	$-0,2185\sigma^2 + 1,2078\sigma + 0,1307$
	0,20	$-0,2274\sigma^2 + 1,2892\sigma + 0,0588$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений находится в пределах 0,98-0,99.



Общая зависимость относительного коэффициента жесткости слоя для разных фракций асфальтогранулята представлена в табл. 5.

Таблица 5 - Влияние напряжения на общий относительный коэффициент жесткости слоя для фракций ($K_{жос}$)

Фракция, мм	Зависимость для расчета коэффициента жесткости слоя $K_{жос} = f(\sigma)$
5-10	$0,2498\sigma^2 + 1,1522\sigma + 0,123$
10-20	$-0,186\sigma^2 + 1,0355\sigma + 0,1498$
5-20	$-0,25\sigma^2 + 1,1574\sigma + 0,1204$
20-40	$-0,2185\sigma^2 + 1,2078\sigma + 0,1307$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений составляет 0,98-0,99.

Установлено, что с увеличением толщины слоя, независимо от размера фракции, коэффициент жесткости слоя снижается. Для установления влияния толщины слоя на коэффициент жесткости слоя принимаем, независимо от фракции, толщину слоя 0,05 м за единицу при действии нагрузки на уплотняемый слой 1,0 МПа. Обозначим принятую величину через коэффициент влияния толщины слоя на коэффициент жесткости слоя (K_{hc}). Зависимости для расчета коэффициента влияния толщины слоя на коэффициент жесткости слоя представлены в табл. 6.

Таблица 6 – Влияние толщины слоя на относительный коэффициент жесткости для разных фракций (K_{hc})

Фракция	Расчетная зависимость $K_{hc} = f(h)$
5-10	$-7h^2 - 0,79h + 1,0$
10-20	$-22h^2 + 0,9h + 1,01$
5-20	$-9h^2 - 0,53h + 1,06$
20-40	$17h^2 - 7,43h + 1,33$

где h – толщина слоя, м. Коэффициенты корреляции уравнений составляют 0,97-0,99.

В общем виде значение коэффициента жесткости слоя асфальтогранулята с учетом размера фракции, с достаточной для практических расчетов, определяется по формулам (табл. 7).

Таблица 7 - Зависимости для расчета коэффициента ($K_{жс}$) для слоя фракций асфальтогранулята

Фракция, мм	$K_{жс} = K_{жос}K_{hc}$	$K_{жhc}$	$K_{жос}$	Коэффициент корреляции
5-10	$0,073K_{hc}$	$-7h^2 - 0,79h + 1,07$	$-0,2495\sigma^2 + 1,1522\sigma + 0,123$	0,96-0,99
10-20	$0,081K_{hc}$	$-22h^2 + 0,9h + 1,01$	$-0,186\sigma^2 + 1,0355\sigma + 0,1498$	0,97-0,99
5-20	$0,073K_{hc}$	$-9h^2 - 0,53h + 1,06$	$-0,25\sigma^2 + 1,1574\sigma + 0,1204$	0,98-0,99
20-40	$0,116K_{hc}$	$17h^2 - 7,43h + 1,33$	$-0,2185\sigma^2 + 1,2078\sigma + 0,1307$	0,99

Анализ экспериментальных данных, представленных в относительных значениях показал, что имеется общая закономерность изменения коэффициента жесткости слоя, независимо от размера фракции и толщины слоя. Для установления влияния размера фракции на коэффициент жесткости слоя принимаем, условно, коэффициент жесткости фракции 5-10 мм при действии нагрузки 1,0 МПа за единицу. Обозначим данную величину через коэффициент влияния размера фракции на коэффициент жесткости слоя ($K_{фр}$). Численное значение коэффициента определяется зависимостью:

$$K_{фр} = 0,0112N^3 - 0,075N^2 + 0,1548N - 0,019, \quad (3)$$

безразмерная величина

где N – порядковый номер фракции асфальтогранулята: 1 – фракция 5-10 мм; 2 – 10-20 мм; 3 – 5-20 мм; 4 – 20-40 мм.

С учетом установленных зависимостей влияния размера фракции, толщины слоя и напряжения общий коэффициент жесткости слоя асфальтогранулята определяется выражением:

$$K_{ж} = K_{жс}K_{ф}K_{hc}, \text{ МПа/мм}. \quad (4)$$

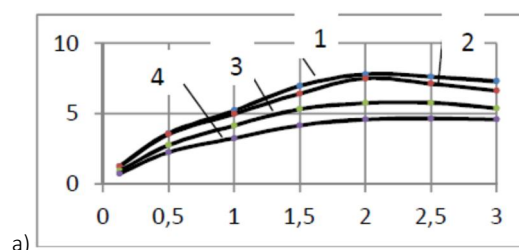
Сравнение результатов расчетов по предложенным зависимостям для расчета коэффициента жесткости слоя с экспериментальными данными показало, что относительная погрешность при определении коэффициента жесткости слоя асфальтогранулята находится в пределах 3 - 5 %.

Определение модуля деформации асфальтогранулята. Обобщенной характеристикой при уплотнении слоя материала, характеризующей деформативную способность слоя под действием нагрузки, является модуль деформации, который является коэффициентом пропорциональности между приращениями давления на слой материала и его деформацией. Модуль деформации слоя материала является характеристикой, влияющей на выбор параметров уплотняющих машин. Численное значение модуля деформации определяется зависимостью:

$$E = \sigma_{дш} / \lambda_{полн}, \text{ МПа} \quad (5)$$

где σ – напряжение под штампом, МПа; $d_{ш}$ – диаметр штампа, м; $\lambda_{полн}$ – полная деформация, м.

По результатам испытаний переработанного асфальтогранулята установлены зависимости модуля деформации слоя от напряжения для разных фракций, которые представлены на рис.3.



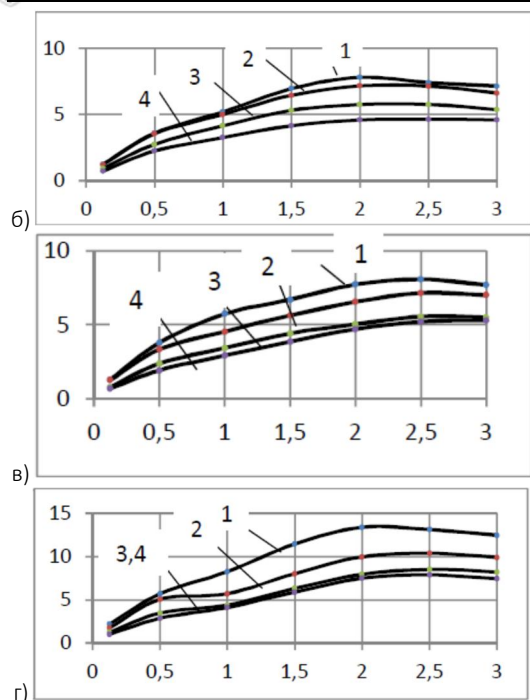


Рисунок 3 – Зависимости модуля деформации от напряжения для разных фракций с учетом толщины слоя при укладке: а – фракция 5-10 мм; б – 10-20 мм; в – 5-20 мм; г – 20-40 мм; 1 – толщина слоя 0,05 м; 2 – 0,10 м; 3 – 0,15 м; 4 – 0,2 м

Из представленных на рис. 3 результатов видно, что деформативная способность слоя асфальтогранулята при одинаковом напряженном состоянии слоя зависит от размера фракций и толщины слоя. В тоже время имеются общие закономерности изменения модуля деформации слоя в процессе уплотнения, независимо от размера фракций и толщины слоя. Максимальное значение модуля деформации слоя зависит от свойств материала и толщины слоя. Если при уплотнении асфальтогранулята фракции 5-10 мм при толщине слоя 0,05 м модуль деформации имеет максимальное значение 7,8 МПа, то при укладке слоя толщиной 0,2 м модуль деформации равен 4,6 МПа. Аналогично меняется значение модуля деформации при уплотнении других фракций асфальтогранулята. Размер минеральных частиц уплотняемого материала также влияет на величину модуля деформации. Если при укладке фракции 5-10 мм толщиной 0,1 м максимальное значение модуля деформации достигает 7,5 МПа, то при уплотнении слоя фракции 20-40 мм модуль деформации слоя равен 10,4 МПа. Выбор силовых параметров уплотняющих машин зависит от модуля деформации слоя, поскольку оказывает влияние на величину контактных напряжений.

Для установления общего влияния напряжения на модуль деформации слоя асфальтогранулята представим данные на рис. 3 в относительных величинах, принимая модуль деформации каждого слоя

при напряжении 1,0 МПа и толщине слоя 0,05 м за единицу. Полученные зависимости для расчета модуля деформации слоя фракции, с учетом безразмерных коэффициентов влияния напряжения ($K_{Е\sigma}$) и толщины слоя ($K_{Еh}$), представлены в табл. 8.

Таблица 8 – Зависимости для расчета модуля деформации для слоя фракций асфальтогранулята

Фракция, мм	$K_{Е\sigma}=K_{Е\sigma}K_{Еh}$	$K_{Е\sigma}$	$K_{Еh}$	Коэффициент корреляции
5-10	$5,2K_{д\sigma 0,05}K_{hc0,05}$	$-0,249\sigma^2 + 1,158\sigma + 0,119$	$-14h^2 + 0,9h + 1,0$	0,96-0,99
10-20	$5,2K_{д\sigma 0,1}K_{hc0,1}$	$-0,248\sigma^2 + 1,149\sigma + 0,123$	$-14h^2 - 0,9h + 1,0$	0,97-0,99
5-20	$5,73K_{д\sigma}K_{hc0,15}$	$-0,187\sigma^2 + 1,037\sigma + 0,151$	$12h^2 - 6,32h + 1,3$	0,98-0,99
20-40	$8,26K_{д\sigma}K_{hc0,20}$	$0,22\sigma^2 + 1,208\sigma + 0,132$	$28h^2 - 10,32h + 1,45$	0,99

Анализ безразмерных коэффициентов влияния напряжения на модуль деформации разных фракций показал, что можно установить общую зависимость влияния напряжения на модуль деформации слоя, не зависящая от размера фракции, которая определяется по формуле:

$$K_{д\sigma\sigma} = -0,226\sigma^2 + 1,138\sigma + 0,132, \quad \text{безразмерная величина} \quad (6)$$

где σ – напряжение, МПа. Коэффициент корреляции уравнений равен 0,99.

Аналогично установлено влияние коэффициента толщины слоя на величину модуля деформации ($K_{дho}$), численное значение которого определяется по формуле:

$$K_{дho} = 1,23e^{-3,09h}, \quad \text{безразмерная величина} \quad (7)$$

где h – толщина слоя, м. Коэффициент корреляции уравнения равен 0,99.

Анализ установленных закономерностей влияния технологических факторов при устройстве слоя (напряжения и толщина слоя) показали, что модуль деформации слоя зависит также от размера фракций асфальтогранулята. Для уточнения влияния размера фракции на модуль деформации слоя принимаем модуль деформации каждой фракции, при толщине слоя 0,05 м и напряжении 1,0 МПа, за единицу. Обозначим принятую величину через коэффициент влияния фракции на модуль деформации слоя ($K_{фр}$), см. рис. 4.

Численное значение коэффициента ($K_{фр}$) определяется зависимостью:

$$K_{фр} = 0,0467N^3 - 0,23N^2 + 0,3633N + 0,82 \quad (8)$$

где N – порядковый номер фракции асфальтогранулята. Коэффициент корреляции равен 1,0.

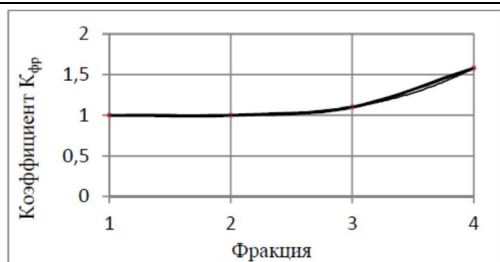


Рисунок 4 – Влияние размера фракции на модуль деформации слоя: 1–фракция 5-10 мм; 2–10-20 мм; 3–5-20 мм; 4–20-40 мм

Из представленной зависимости на рис. 4 видно, что размер фракции асфальтогранулята 5-10 мм и 10-20 мм при уплотнении не оказывают существенного влияния на модуль деформации слоя. При уплотнении слоев фракций 5-20 мм и 20-40 мм размеры фракции асфальтогранулята влияют на модуль деформации слоя за счет образования контактов между частицами и повышения жесткости слоя соответственно в 1,1 и 1,6 раза. С учетом полученных зависимостей влияния размера фракции, толщины слоя и напряжения общий модуль деформации слоя асфальтогранулята определяется выражением:

$$E_d = 5,2K_{жс}K_{ф}K_{н}, \text{ МПа} \quad (9)$$

где $K_{жс}$, $K_{ф}$, $K_{н}$ – коэффициенты.

На основании полученных результатов влияния технологических факторов влияния на характеристики асфальтогранулята, влияющих на выбор параметров уплотняющих машин при устройстве дорожных конструкций, можно сделать следующие **выводы**:

- установлены закономерности влияния нагрузки на слой асфальтогранулята при устройстве дорожных конструкций с учетом размера фракций и толщины укладываемого слоя;
- получены аналитические зависимости между характеристиками материала слоя материала и действующей уплотняющей нагрузкой;
- полученные зависимости характеристик асфальтогранулята, с учетом состава и толщины слоя при укладке, могут быть использованы при моделировании технологических процессов устройства до-

рожных конструкций с требуемыми прочностными характеристиками;

- полученные зависимости влияния гранулометрического состава смеси и толщины слоя на деформативную способность уплотняемого материала позволяет определить расчетные напряжения под вальцом катка, что позволяет обосновать требуемые параметры уплотняющих машин.

Библиографический список

1. Гезенцевей, Л.Б. Дорожный асфальтобетон / Л.Б. Гезенцевей, Н.В. Горелышев, А.М. Богуславский, И.В. Королев - М.: Транспорт, 1985. – 239 с.
2. Хархута, Н.Я. Вопросы теории уплотнения дорожных покрытий / Н. Я. Хархута // Уплотнение земляного полотна и дорожных одежд: тр. Союздорнии. – М., 1980. – С. 64-71.
3. Зубков, А.Ф. Технология строительства и ремонта дорожных покрытий нежесткого типа с учетом температурных режимов асфальтобетонных смесей / А.Ф. Зубков, К.А. Андрианов, А.И. Антонов, В.Г. Однолько - Тамбов: ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2017. - 300с.
4. Определение влияния параметров слоя материала из асфальтогранулята при укреплении обочин автомобильных дорог / К. А. Андрианов, А. Ф. Зубков, П. В. Монастырев [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 3(22). – С. 40-45. – DOI 10.51608/26867818_2023_3_40. – EDN QABSHB.
5. Сенибабнов, С. А. Методика разработки технологии устройства дорожных конструкций с применением асфальтогранулята / С. А. Сенибабнов, К. А. Андрианов, А. Ф. Зубков // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2020. – № 2(58). – С. 84-99. – DOI 10.36622/VSTU.2020.58.2.007. – EDN PJQCVW.
6. Influence of thickness and granulometric composition of granular asphalt on its strength characteristics when placing into the road pavement / E. G. Pakhomova, K. Andrianov, A. Zubkov, P. Monastyrev // Journal of Applied Engineering Science. – 2020. – Vol. 18, No. 2. – P. 192-197. – DOI 10.5937/jaes18-26311. – EDN IWIIUA.
7. Calculation of the Number of Roller Passes When Strengthening Roads Using Recycled Asphalt Granulate / S. A. Senibabnov, K. A. Andrianov, A. F. Zubkov, Yu. I. Kalgin // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2024. – No. 4(64). – P. 81-90. – DOI 10.36622/2542-0526.2024.64.4.009. – EDN CGHYOR.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 13.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 13.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья
УДК 691.32 + 693.54
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
БАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2025_4_59

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ НА ДЕФОРМАТИВНУЮ СПОСОБНОСТЬ СЛОЯ АСФАЛЬТОГРАНУЛЯТА

© Авторы 2025
SPIN-код: 4265-7935

Ильина Лилия Владимировна
советник РААСН, доктор технических наук, профессор, директор института
цифровых и инженерных технологий
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
«Сибстрин» (Россия, Новосибирск, e-mail: nsklika@mail.ru)*

SPIN-код: 5904-8531

ЦЕКАРЬ Денис Анатольевич
аспирант
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
«Сибстрин» (Россия, Новосибирск, e-mail: tsekden@gmail.com)*

SPIN-код: 1654-0074

МОЛОДИН Владимир Викторович
Советник РААСН, доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой технологии и организации строительства
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
«Сибстрин» (Россия, Новосибирск, e-mail: molodin@sibstrin.ru)*

Аннотация. Добавки в современных цементных системах могут существенно изменять прочностные характеристики цемента и технологические свойства бетонных смесей на его основе. В публикуемой статье приведены результаты исследования влияния комплексной добавки на прочностные характеристики, модифицированного вяжущего при твердении в течение 1, 3 и 28 суток в стандартных условиях. Для определения изменения фазового состава цементной системы при ее модифицировании были применены рентгенофазовый и комплексный термический анализы. По результатам анализа данных проведенного эксперимента выявлено, что лучшего упрочняющего эффекта удалось достичь при модифицировании цементной системы комплексной добавкой, содержащей 2 % минерального компонента и 0,6 % пластификатора. При этом прочность при изгибе у состава с применением комплексной добавки на 15,6 %, а при сжатии в 2,3-2,4 раза выше прочности контрольного бездобавочного состава. Результаты проведенного рентгенофазового анализа (РФА) показали, что при измельчении минеральной составляющей комплексной добавки происходит не только ее помол, но механохимическая ее активация, а дифференциально-термический анализ (ДТА) выявил, что минеральная составляющая комплексной добавки повышает реакционную способность цементной матрицы за счет увеличения площади поверхности контакта «вода-цемент» и стимуляции нуклеации гидратных фаз. Новые возможности приобретения прочности бетонами на модифицированном вяжущем меняют характер их применения в строительном производстве. Сокращение сроков до распалубки конструкций ведёт к реальному сокращению продолжительности строительства и трудоёмкости производства работ. Таким образом, разработано технологическое решение, существенно увеличивающее прочностные характеристики цементных систем и возможности их применения. При этом упрочняющий эффект наблюдается как в начальные сроки твердения, так и в стандартном возрасте.

Ключевые слова: комплексная добавка, портландцемент, тонкодисперсная минеральная составляющая, органическая составляющая, повышение прочностных характеристик цементных систем

Для цитирования: Ильина Л.В., Цекарь Д.А., Молодин В.В. Влияние состава комплексной добавки на прочностные характеристики модифицированного вяжущего // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 59-66. doi:10.51608/26867818_2025_4_59.



Original article

INFLUENCE OF THE COMPOSITION OF A COMPLEX ADDITIVE ON THE STRENGTH AND TECHNOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MODIFIED CEMENT SYSTEMS

© The Author(s) 2025

ILINA Liliia Vladimirovna

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof.,
Director of the Institute of Digital and Engineering Technologies
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering
(Russia, Novosibirsk, e-mail: nsklika@mail.ru)

TSEKAR Denis Anatolyevich

PhD Candidate
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering "Sibstrin"
(Novosibirsk, Russia, e-mail: tsekden@gmail.com)

MOLODIN Vladimir Viktorovich

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Associate Professor,
Head of the Department of Construction Technology and Organisation
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering
(Russia, Novosibirsk, e-mail: molodin@sibstrin.ru)

Abstract. Additives in modern cement systems can significantly alter the strength properties of cement and the technological properties of concrete based on it. This article presents the results of a study examining the effect of a complex additive on the strength properties of a modified binder cured for 1, 3, and 28 days under standard conditions. X-ray phase analysis and complex thermal analysis were used to determine the changes in the phase composition of the cement system during modification. Analysis of the experimental data revealed that the best strengthening effect was achieved by modifying the cement system with a complex additive containing 2% mineral component and 0.6% plasticizer. Furthermore, the flexural strength of the composition using the complex additive was 15.6% higher, and the compressive strength was 2.3-2.4 times higher than the control composition without the additive. The results of X-ray diffraction (XRD) analysis showed that grinding the mineral component of the complex additive not only results in its milling but also in its mechanochemical activation. Differential thermal analysis (DTA) revealed that the mineral component of the complex additive increases the reactivity of the cement matrix by increasing the water-cement contact surface area and stimulating the nucleation of hydrated phases. New possibilities for gaining concrete strength using modified binders are changing the nature of their application in construction. Reducing the formwork removal time of structures leads to a real decrease in construction duration and labour intensity of the work. Thus, a technological solution has been developed that significantly improves the strength properties of cement systems and the possibilities of their application. The strengthening effect is observed both at the initial stages of hardening and at standard ages.

Keywords: complex additive; Portland cement; finely dispersed mineral component; organic component; increasing the strength characteristics of cement systems

For citation: Ilyina L.V., Tserkar D.A., Molodin V.V. Influence of the composition of a complex additive on the strength and technological characteristics of modified cement systems // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 59-66. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_59.

Введение. Современные вызовы в области строительных материалов требуют разработки инновационных подходов к модификации традиционных вяжущих материалов. Повышение качества бетона и железобетона является перспективным направлением. В свете Указа Президента Российской Федерации от 28 февраля 2024 г. № 145 «О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации» перед строительной отраслью поставлены ряд задач, которые направлены на создание условий для преодоления последствий кризисных явлений, внедрения импортозамещающих отечественных

строительных материалов, а также внедрение технологий, которые увеличивают объемы жилищного строительства. Особую актуальность приобретают исследования, направленные на создание новых материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, обеспечивающими технологический суверенитет и устойчивое развитие строительной отрасли России. Так как одним из основных материалов применяемый при строительстве является бетон, то именно на него обращено особое внимание.

В настоящее время широко используются высокопрочные и многофункциональные бетоны но-



вого поколения [1 - 4]. Российские ученые активно разрабатывают новые способы улучшения эксплуатационных характеристик цементных составов путем модифицирования их добавками направленного действия [5 - 9]. Среди них выделяются добавки, которые комплексно действуют на процессы структурообразования, что приводит к формированию более плотной и однородной структуры цементного камня. В этой связи одним из ключевых направлений является использование микродисперсных минеральных добавок, которые позволяют модифицировать структуру цементного камня, оптимизировать процессы гидратации и снижать количество порتلандцемента в композитных материалах [10 - 14].

Эффективными упрочняющими и ускоряющими добавками, влияющими на микроструктуру цементного камня, могут выступать тонкодисперсные минеральные добавки. Выбор добавок должен определяться близостью их термодинамических характеристик и химического состава с минералами клинкера, и, следовательно, возможностью данных добавок выступать подложками для кристаллизации гидратных новообразований [3, 10 - 14].

Согласно ряду исследований [4, 7, 9, 11], высокая плотность и прочность композиционных материалов достигается за счет введения нано- и ультрадисперсных частиц, таких как углеродные волокна, фуллерены или микрокремнезем. Объясняется это тем, что частицы, обладая значительной удельной поверхностью и высоким энергетическим потенциалом, даже в малых количествах способствуют эффективному уплотнению и упрочнению структуры.

В исследованиях Величко Е.Г и Шумилина Ю.С. [6] изучено формирования плотной микроструктуры цементного камня в бетоне с добавлением углеродных нановолокон всего в количестве 25 г на 1 м³. Для приготовления смеси применялись: портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (удельная поверхность 296 м²/кг), молотый гранулированный шлак (453 м²/кг), микрокремнезем, тонкомолотый цемент, песок двух фракций (0,315 мм – 80 % и 0,16 мм – 20 %), щебень фракции 5-10 мм (760 кг), суперпластификатор Glenium 430 (3,7 кг) и ускоритель твердения АС (0,56 кг). Особенностью тонкомолотого цемента было повышенное содержание частиц размером 5-30 мкм (до 60 %), что более чем в два раза превышало данный показатель в обычном портландцементе. Водоцементное отношение смеси составило 0,28, а расплыв конуса достигал 78 см, что характеризует ее как самоуплотняющуюся.

Так как наибольшего упрочнения цементной матрицы можно достичь при наименьшей пустотности между частицами добавки и вяжущего, то ряд ученых указывает на необходимость контроля размерности их зерен [10 - 14].

Цель работы – разработка научно обоснованного технологического решения обеспечивающего получение цементных систем с повышенными прочностными характеристиками путем введения комплексной добавки, состоящей из микродисперсной минеральной составляющей способной упрочнять и уплотнять цементный композит и органической составляющей способной снижать количество воды затворения и повышающей физико-механическими свойствами цементных композитов и повышать технологические свойства бетонных смесей на их основе.

Задачи исследования:

1. провести анализ влияния минеральной составляющей на прочностные показатели цементных систем;

2. провести анализ влияния органической составляющей на прочностные показатели цементных систем;

3. определить изменение физико-механических характеристик цементных композитов путем введения комплексной добавки, состоящей из минеральной (тонкодисперсные цементные кристаллогидраты) и органической (поликарбоксилатный пластификатор) составляющих;

Методы и материалы. В качестве вяжущего вещества в работе использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н ООО «Ачинский цемент» (г. Ачинск, Красноярский край), который имел следующий минеральный состав, мас. %: C₃S – 67, C₂S – 11, C₃A – 5, C₄AF – 13.

Таблица 1 – Характеристика портландцемента

Наименование показателя	Требуемое значение	Фактическое значение
Сроки схватывания: начало, мин конец, мин	не ранее 60 не нормируется	230 290
Нормальная густота, %	не нормируется	27,2
Прочность при изгибе: - в возрасте 2 суток, МПа - в возрасте 28 суток, МПа	не нормируется не нормируется	5,7 8,6
Прочность при сжатии: - в возрасте 2 суток, МПа - в возрасте 28 суток, МПа	не менее 20,0 от 42,5 до 62,5	23,7 53,4

В качестве мелкого заполнителя применялся кварцевый песок ООО «ЗССМ» карьер «Катовский-4». Насыпная плотность которого составляла 1550 кг/м³, модуль крупности – 1,88.

В исследовательской работе была применена комплексная добавка, включающая минеральную и органическую составляющие. Минеральная составляющая комплексной добавки, образована путем измельчения цементного камня в мельнице-активаторе планетарного типа АГО-2 до среднего диаметра



частицы 5,9 мкм. При этом цементный камень получен из цементного теста нормальной густоты, твердевшего 28 суток в стандартных условиях. Измерение дисперсности минерального компонента осуществлялось в Лазерным анализатором размеров частиц Shimadzu (Шимадзу) SALD-7500 nano, оборудованном проточной ячейкой SALD-MS75. В качестве органического компонента использовался поликарбоксилатный суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ ПК», представляющий собой сополимер на основе полиэксиленовых производных ненасыщенных карбоновых кислот.

Методы исследования:

- определение физико-механических характеристик (прочность при изгибе, прочность при сжатии) цементных композитов после введения комплексной минеральной добавки в разных процентных отношениях. За контрольный состав применялся состав без добавок.

Для оценки фазового состава полученной минеральной составляющей комплексной добавки применялся рентгенофазовый анализ (РФА). Дифрактограммы регистрировались на порошковом дифрактометре Bruker D8 Advance в геометрии Брегга-Брентано с CuK α -излучением. За контрольный состав был принят состав, измельченный вручную до полного прохождения через сито № 008. Остальные образцы измельчались на мельнице-активаторе планетарного типа АГО-2 в течение 1, 3 и 5 минут.

Для объяснения ускоряющего эффекта гидратационных процессов при введении дисперсной минеральной добавки применялся дифференциально-термический анализ (ДТА). ДТА проводился на дифференциальном термическом анализаторе DTG60H производства фирмы «Shimadzu» (Япония). Тепловой режим составлял от 30 до 1000 °С, скорость подъема температуры-10 °С /мин.

Для испытания на прочность при изгибе и сжатии формовались образцы балочки размером 40×40×160 мм, которые набирали прочность в нормальных условиях в течение 1, 3 и 28 суток. Соотношение цементно-песчаной смеси составляло 1:3, с добавлением комплексной минеральной добавки в процентном соотношении от массы портландцемента. Количество воды определялось в соответствии с ГОСТ 310.4-81. После твердения образцы подвергались механическим испытаниям.

Последовательность приготовления смеси:

- перемешивание в сухом виде цемента и комплексной добавки;
- добавление в полученную смесь песка с дальнейшим перемешиванием в сухом состоянии;
- добавление воды и перемешивание смеси.

Планирование, результаты и обсуждение эксперимента. Проведенные исследования физико-механических характеристик показали, что введение

модифицирующих добавок способствует значительному повышению прочностных характеристик модифицированного вяжущего. При эксперименте были применены разные комбинации составов с количеством минеральной составляющей от 0 до 3 мас. % и пластификатором (ПЛ) от 0 до 0,9 мас. %. Результаты испытаний на 1, 3 и 28 суток на сжатие и изгиб приведены в таблице 2 и на рис. 1-3.

Таблица 2 – Изменение прочностных характеристик модифицированного цемента путем введения комплексной добавки

Количество минеральной составляющей комплексной добавки, мас. %	Количество органической составляющей комплексной добавки, мас. %							
	0		0,3		0,6		0,9	
	прочность, МПа, при							
	сжатии	изгибе	сжатии	изгибе	сжатии	изгибе	сжатии	изгибе
продолжительность твердения 1 сутки								
0	12,5	5,2	14	5,3	15,8	5,3	13,1	5,4
1	20	5,4	27,3	5,7	28	5,8	26,8	5,7
2	23,1	5,6	28,5	5,8	30,1	5,9	29	5,9
3	22,1	5,5	26,2	5,8	26,7	5,8	25,1	5,7
продолжительность твердения 3 сутки								
0	21	7,7	24,8	7,8	28,3	7,9	29,5	8
1	33,1	8	44,9	8,5	45,7	8,6	44,1	8,5
2	38,5	8,3	46,6	8,7	48,6	8,9	47,3	8,8
3	35,3	8,2	42	8,7	43,5	8,7	41,8	8,6
продолжительность твердения 28 сутки								
0	43	9,1	50,1	9,2	56	9,3	58,7	9,3
1	67,2	9,3	88,8	9,8	91,1	9,9	87,6	10,7
2	77,6	9,7	94,1	10,1	98,2	10,3	95,3	10,2
3	71,4	9,5	84,8	10,9	87,2	10,1	81,5	9,9

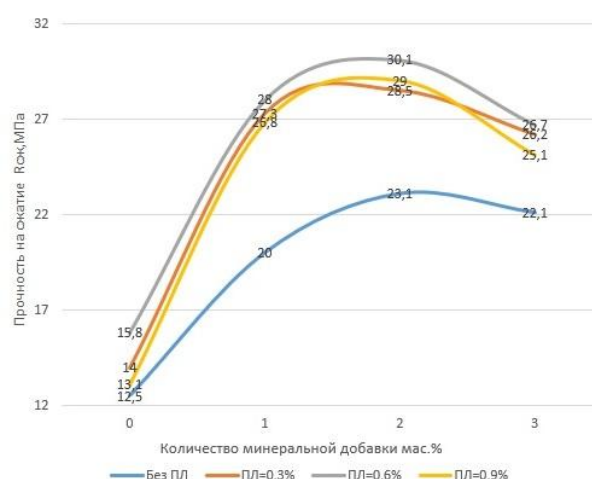


Рисунок 1 – Влияние на прочность при сжатии количества минеральной составляющей комплексной добавки при твердении в течение 1 суток в нормальных условиях

Анализ экспериментальных данных показал, что наибольшие прочностные показатели получены



при добавлении 2,6 мас. % комплексной добавки, содержащей 2 мас. % минерального компонента и 0,6 мас. % пластификатора. При этом удалось достичь увеличения прочности на изгиб на 15,6 %, а прочности при сжатии в возрасте 28 суток в 2,3-2,4 раза.

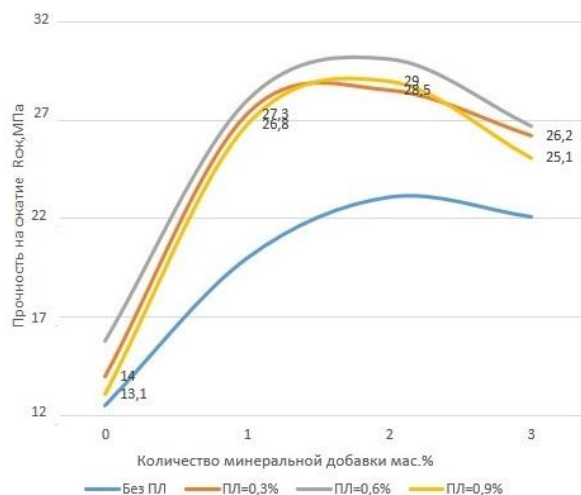


Рисунок 2 – Влияние на прочность при сжатии количества минеральной составляющей комплексной добавки при твердении в течение 3 суток в нормальных условиях

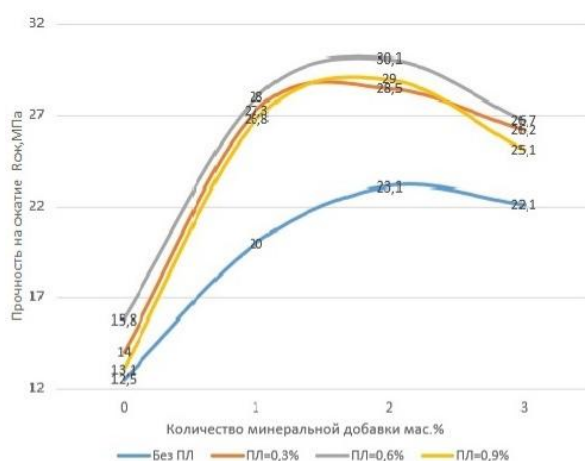


Рисунок 3 – Влияние на прочность при сжатии количества минеральной составляющей комплексной добавки при твердении в течение 28 суток в нормальных условиях

Для объяснения, ускоряющего и упрочняющего эффектов при введении минеральной составляющей комплексной добавки, был проведен рентгенофазовый анализ (РФА).

Анализ изменения величин пиков гидратных новообразований в зависимости от продолжительности помола минеральной составляющей комплексной добавки (рис. 4, 5) показал, что при более тонком помоле минеральной добавки происходит:

- увеличение интенсивности пиков C-A-H ($d=2,97; 2,44; 2,32; 2,18; 1,8; 1,76 \text{ \AA}$), пиков C-S-H ($d=2,77; 2,63 \text{ \AA}$), пиков тоберморита ($d=3,03; 1,8 \text{ \AA}$) и пиков портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ($d=4,1; 1,9; 1,7 \text{ \AA}$),

- снижение интенсивности пиков непрореагировавших силикатных фаз ($d = 3,28; 3,11; 2,88; 2,37 \text{ \AA}$) и пиков непрореагировавших алюминатных фаз ($d = 2,88; 2,65; 2,05 \text{ \AA}$).

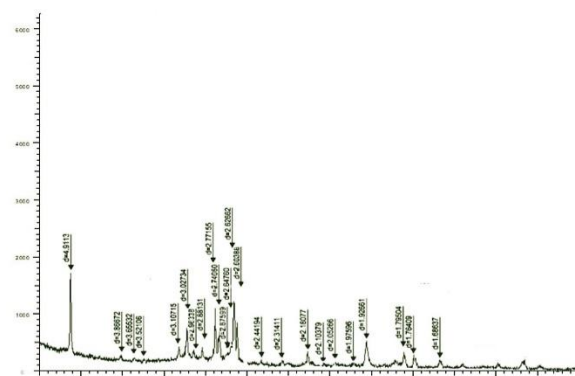


Рисунок 4 – Дифрактограмма добавки дисперсностью 45,3 мкм

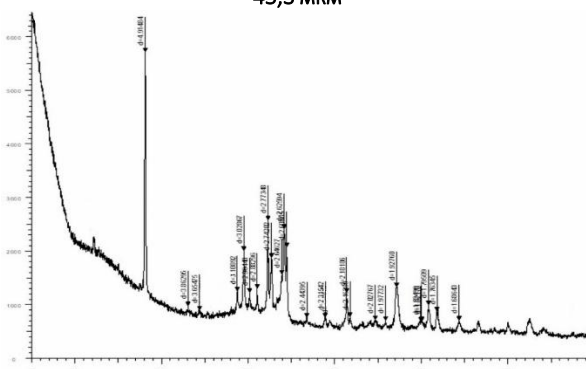


Рисунок 5 – Дифрактограмма добавки дисперсностью 5,9 мкм

На основании проведенного исследования можно констатировать, что при тонком измельчении минеральной добавки происходит не только помол, но и ее механоактивация.

Для дальнейшего объяснения выявленного упрочнения и изменения кинетики твердения цементных систем при их модифицировании был проведен комплексный термический анализ бездобавочного и модифицированного камня, твердевшего в течение 28 суток в нормальных условиях. Результаты потери массы при комплексном термическом анализе приведены в табл. 3.

Процессы, связанные с разложением гидратных новообразований при различных температурах, являются важными для понимания структуры и свойств гидратированного цемента. Исследования показывают, что при температуре:

- 100-200 °C – дегидратация отдельных гидроферритов, гидроалюминатов, гидрокарбоалюминатов и гидросульфоалюминатов кальция и гипса;
- 100-500 °C – дегидратация низкоосновных C-S-H (I) и высокоосновных C-S-H (II) гидросиликатов кальция;



- 300-350 °С – дегидратация отдельных гидроалюминатов кальция;
- 450-500 °С – разложение гидроксида кальция;
- 500-700 °С – разлагаются отдельные гидросиликаты кальция, гидрогранаты и гидроферриты кальция;
- 700-750 °С – происходит разложение карбоната кальция, который может образовываться при взаимодействии CaO, выделяющегося из Ca(OH)₂, с CO₂ во время проведения ДТА;
- 750-900 °С – дегидратация отдельных гидросиликатов кальция [18-19].

При анализе потери масс при комплексном термическом анализе можно отметить, что у цементного камня с введенной дисперсной минеральной добавкой (диаметр частиц 45,3 мкм) потеря массы при температурах 100-120, 420-450 и 620-680 °С значительно меньше, чем у цементного камня, модифицированного более дисперсной минеральной добавкой (диаметр частиц 5,9 мкм). Термический анализ (ДТА/ТГ) подтвердил увеличение содержания гидратных фаз (C-S-H, этtringит, портландит и др.) в цементном камне при его модифицировании более тонкодисперсной минеральной добавкой (диаметр частиц 5,9 мкм) на 20–25 % по сравнению с модифицированием минеральной добавкой большей дисперсности (диаметр частиц 45,3 мкм) (табл. 3).

Таблица 3 – Потери массы, связанные с разложением гидратных новообразований модифицированного цементного камня

Диаметр частиц минеральной составляющей, мкм	Потери массы, связанные с разложением гидратных новообразований при различных температурах				
	химически связанная вода	100-200	450-500	500-700	700-750
45,3	12,6	5,0	5,3	43,3	2,3
5,9	17,5	9,2	11,5	66,2	2,8

Комплексная добавка состоит из двух компонентов: минерального (2 мас. %) и органического (0,6 мас. %) пластификатора. Механизм их влияния различен. Наибольшие прочностные характеристики цемента при введении минеральной добавки (цементные кристаллогидраты) с диаметром частиц 5,9 % можно объяснить тем, что:

- использование цементных кристаллогидратов обосновано его химическим сродством с клинкерными минералами и продуктами их гидратации. Таким образом, минеральная добавка способна выступать центрами кристаллизации, что, в свою очередь, способствует образованию дополнительных кристаллических фаз, уплотняющих структуру материала;

- измельчение минеральной добавки до средней дисперсности частиц 5,9 мкм происходит не только помол, но и ее механоактивация;
- увеличивается степень гидратации цементной системы, подтверждаемая увеличением содержания гидратных фаз (C-S-H, этtringит, портландит и др.) и химически связанной воды;
- тонкодисперсные частицы (средний диаметр частиц 5,9 мкм) минеральной добавки с меньшим диаметром, чем диаметр частиц молотого клинкера, и размером меньше, чем размер межзерновой пустотности вяжущего (рис. 6), располагаются в межзерновой пустотности клинкерных частиц и за счет этого происходит уплотнение исходной системы.

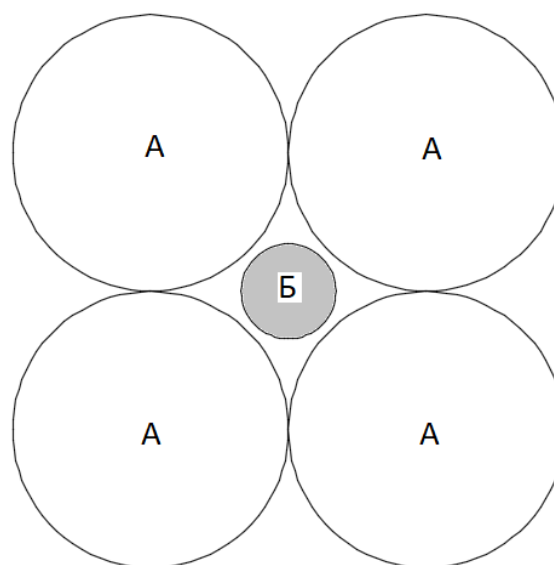


Рисунок 6 – Схема расположения частиц молотого клинкера (А) и тонкодисперсной минеральной добавки (Б)

Если предположить, что частицы клинкера и минеральной добавки имеют сферическую форму, то, исходя из теории плотнейшей упаковки частиц, дозировку инертной минеральной добавки (%) можно рассчитать по формуле [14]:

$$n_d = \frac{\frac{\pi D_d^3}{6} \times \rho_d}{k \times \frac{\pi D_c^3}{6} \times \rho_c} \times 100\% = \frac{1}{k} \times \frac{D_d^3}{D_c^3} \times \frac{\rho_d}{\rho_c} \times 100,$$

где: k – координационное число, зависящее от размера частиц;

D_d – средний диаметр частиц добавки, мкм;

D_c – средний диаметр частиц цемента, мкм.

Теоретически рассчитанное по данной формуле оптимальное количество добавки, приводящее к наибольшему упрочнению, составляет 1,65 %, что близко к экспериментальному оптимальному количеству добавки составляющему 2 % (табл. 2).

В соответствии с экспериментальными данными, приведенными в табл. 2 при использовании



комплексной добавки оптимальным процент применяемого в добавке пластификатора, при котором получены лучшие прочностные показатели для применяемого пластификатора, является 0,6 мас. % от портландцемента. Рост прочности цементных композиций при введении пластификатора связан в первую очередь со снижением количества воды затворения. Применение поликарбоксилатного пластификатора обусловлено тем, что они адсорбируются в основном на алюминатных составляющих цемента (C_3A и C_4AF) и поэтому оказывают значительное влияние на свойства цементной пасты в первые минуты после затворения водой. Применяемый в работе портландцемент производства ООО «Ачинский цемент» имеет низкое содержанием алюминатных фаз, и поэтому влияние на кинетику процесса гидратации не оказывает. Кроме того, исходя из литературных данных, поликарбоксилатный пластификатор рекомендуют применять именно с такими цементами.

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о том, что введение комплексной добавки способствует более полной гидратации цементных систем, что подтверждается данными термического анализа. Указанное явление объясняет наблюдаемое повышение прочностных показателей цементных композиций при использовании тонкодисперсных модифицирующих добавок.

Свод правил СП 70.13330.2012 (актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 Несущие и ограждающие конструкции) п. 5.3.12 требует минимальную прочность бетона 1,5 МПа при укладке на него нового слоя, а п.10 табл. 5.11 – 0,5 МПа для распулочки вертикальных поверхностей конструкций из условия сохранения формы. Эти требования легко выполняются модифицированием цемента введением комплексной добавки и для основных составов бетонов существенно сокращает продолжительность СМР и трудоёмкость работ.

Заключение. Таким образом, разработано научно обоснованное технологическое решение, обеспечивающее получение цементных систем с повышенными прочностными характеристиками путем введения комплексной добавки, состоящей из микродисперсной минеральной составляющей способной упрочнять и уплотнять цементный композит и органической составляющей способной снижать количество воды затворения и повышающей физико-механическими свойствами цементных композитов и в дальнейшем сокращать продолжительность и трудоёмкость бетонных работ.

Проведенные исследования показали эффективность применения комплексной добавки, состоящей из минеральной (цементные кристаллогидраты) и органической (поликарбоксилатный пластификатор) составляющих. Комплексное применение данных составляющих добавки позволяет получить мо-

дифицированное вяжущее с высокими прочностными характеристиками:

- повышение прочности при изгибе на 15,6 %.
- повышение прочности при сжатии в 2,3-2,4

раза.

Оптимальным соотношением использования комплексной добавки является состав с содержанием добавки в количестве 2,6 % от массы цемента, содержащей 2 % минеральной составляющей дисперсностью 5,9 мкм и 0,6 % органической составляющей.

Библиографический список

1. Тараканов, О. В. Применение модифицированных бетонов нового поколения в строительстве / О. В. Тараканов, Т. К. Акчурина, Е. А. Белякова // Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура. – 2022. – № 1(86). – С. 163-174. – EDN: WBCJXO.
2. Харченко, А.И. Структура и свойства мелкозернистых бетонов на основе композиционных вяжущих / А.И. Харченко, В.А. Алексеев, И.Я. Харченко, Д.А. Баженов // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 3. С. 322-331. DOI: 10.22227/1997-0935.2019.3.322-331.
3. Ильина, Л.В. Повышение прочностных характеристик цементных конгломератов добавками направленного действия / Л.В. Ильина, В.В. Молодин Н.О. Гичко, А.К. Туляганов // Строительные материалы. 2023. № 7.- С. 36-42. DOI: 10.31659/0585-430X-2023-815-7-36-42.
4. Копаница, Н.О. Комплексные добавки на основе вторичных ресурсов для модификации цементных композиций / Н.О. Копаница, О.В. Демьяненко, А.А. Куликова // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2023. Т. 334. № 1. С. 136-144. DOI 10.18799/24131830/2023/1/4045.
5. Толмачев, С.Н. Разработка технологических критериев совместимости суперпластификаторов с цементами / С.Н. Толмачев, Е.А. Беличенко, А.В. Брапенник // Строительные материалы. 2016. № 5. -С. 60-65. – EDN: WDELLJ
6. Величко Е.Г. К проблеме формирования дисперсного состава и свойств высокопрочного бетона / Величко Е.Г., Шумилина Ю.С. // Вестник МГСУ. 2020. Т. 15. С. 235-243. DOI: 10.22227/1997-0935.2020.2.235-243
7. Stefanidou, M. Influence of nano-SiO₂ on the cement pastes / M. Stefanidou, I. Papayianni // Composites Part B: Engrineer – ring. 2012. Vol. 43. №6. Pp. 2706-2710. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.12.015>.
8. Лесовик, В.С. Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композиций / В.С. Лесовик, Р.С. Федюк, Ю.Л., Лисейцев, И.И. Панарин, В.В. Воронов // Строительные материалы. 2022. № 9. С. 39-49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49.
9. Trofimov, B.Y., The structure and properties of hardened cement paste with modifiers/ B.Y. Trofimov, A.M. Mahmudov // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Сер. «International Conference on Construction, Architecture and Technosphere safety, ICCATS 2020 – Number 2» 2020. Vol 962, pp. 022011. DOI: 10.1088/1757-899X/962/2/022011.
10. Ilina L.V., Samchenko S.V., Rakov M.A., Zorin D.A. Modeling the Kinetics of Cement Composite Processes Modi-



fied with Calcium-Containing Additives. *Nanotechnologies in construction*. 2023; 15(5): 494–503. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-494-503>. – EDN: WVIFWH.

11. Ильина, Л. В. Ускорение процесса схватывания цементных систем путем введения тонкодисперсного модификатора / Л. В. Ильина, С. М. Анпилов, Д. А. Цекарь // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 5(797). – С. 96-104. – DOI 10.32683/0536-1052-2025-797-5-96-104. – EDN XAXTKF.

12. Ильина, Л. В. Влияние модифицирования цементной матрицы тонкодисперсной минеральной добавкой на её характеристики / Л. В. Ильина, С. М. Анпилов, Д. А. Цекарь // Вестник Инженерной школы Дальневосточ-

ного федерального университета. – 2025. – № 1(62). – С. 155-165. – DOI 10.24866/2227-6858/2025-1/155-165. – EDN QZXOZH.

13. Лесовик В.С., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Панарин И.И., Воронов В.В. Влияние состава на свойства и строение модифицированных цементных композиций/ Р.С. Федюк, Ю.Л. Лисейцев, И.И. Панарин, В.В. Воронов // Строительные материалы. 2022. № 9. С. 39-49. DOI: 10.31659/0585-430X-2022-806-9-39-49.

14. Ilina, L. Aerated dry mix concrete for remote northern territories / L. Ilina, A. Kudyakov, M. Rakov // Magazine of Civil Engineering. – 2022. – No. 5(113). – DOI 10.34910/MCE.113.10. – EDN CDHQSU.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 31.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 31.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья
УДК 691.328.1
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
ВАК: 2.1.1 Строительные конструкции, здания и сооружения
doi:10.51608/26867818_2025_4_67

АЛГОРИТМ ВЫЧИСЛЕНИЯ ФУНКЦИИ ИЗГИБАЮЩЕГО МОМЕНТА ОТ ДЕФОРМАЦИЙ НОРМАЛЬНЫХ СЕЧЕНИЙ ИЗГИБАЕМЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ДИАГРАММ СОСТОЯНИЯ МАТЕРИАЛОВ

© Автор 2025
SPIN: 2918-4551

КОЗЛОВ Александр Вячеславович
кандидат технических наук, доцент
Самарский государственный технический университет
(Россия, Самара, e-mail: kozalv1@yandex.ru)

Аннотация. Приведены результаты совершенствования алгоритма, реализованного в среде MahCAD, позволяющего с использованием уравнения деформирования бетона установить напряженно-деформированное состояние изгибаемого железобетонного элемента на любой стадии работы, а также с единых позиций оценить его несущую способность для нормально и перearмированных сечений.

Ключевые слова: алгоритм, расчёт, изгибаемый железобетонный элемент, несущая способность, деформация

Для цитирования: Козлов А.В. Алгоритм вычисления функции изгибающего момента от деформаций нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов с применением диаграмм состояния материалов // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 67-71. doi:10.51608/26867818_2025_4_67.

Original article

ALGORITHM FOR CALCULATING THE BENDING MOMENT FUNCTION FROM DEFORMATIONS OF NORMAL CROSS-SECTIONS OF BENDING CONCRETE ELEMENTS USING MATERIAL CONDITION DIAGRAMMS

© The Author(s) 2025

KOZLOV Alexander Vyacheslavovich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Samara State Technical University
(Russia, Samara)

Abstract. The results of improving the algorithm implemented in the MahCAD environment are presented, which allows using the concrete deformation equation to establish the stress-strain state of a bent reinforced concrete element at any stage of operation, as well as to evaluate its bearing capacity from uniform positions for normally and over-reinforced sections.

Keywords: algorithm; calculation; bending reinforced concrete element; load-bearing capacity; deformation

For citation: Kozlov A.V. Algorithm for calculating the bending moment function from deformations of normal cross-sections of bending concrete elements using material condition diagrams // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 67-71. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_67.

Введение. В настоящее время, с учётом развития компьютерных технологий, становятся актуальными не только задачи повышения математической точности и достоверности расчётов строительных конструкций, но и численный учёт особенностей поведения материалов, из которых они сделаны.

Ещё в 70-е года XX века в [1] выделены принципиальные направления совершенствования расчётов строительных конструкций, среди которых отмечены пути, связанные с определением напряженно-деформированного состояния (далее по тек-

сту – НДС) элементов не только в предельной, но и в эксплуатационной стадии, учётом специфических свойств материалов, применением вычислительной техники. В [2] убедительно показано одно из специфических свойств бетона, а именно – нелинейная связь между напряжениями и деформациями на всех уровнях загрузки, аналитически описываемая различными уравнениями.

Настоящая работа посвящена совершенствованию методики определения НДС изгибаемых железобетонных элементов с любым процентом арми-

рования на всех стадиях работы с учётом аналитически описанной нелинейной связи между деформациями и напряжениями бетона, предложенной в [3].

Методология. В целях получения формальной численной оценки НДС железобетонного сечения в работе применён метод научного моделирования, в частности – математического моделирования.

Для реализации изложенного, на кафедре ЖБК, в среде MathCAD, разработан алгоритм [3], позволяющий в автоматическом режиме определять функцию величины изгибающего момента в нормальном сечении изгибаемого элемента в зависимости от относительных деформаций крайних сжатых волокон бетона на всех стадиях загрузки и для произвольного процента армирования. В целях достижения дополнительной универсальности предусмотрена возможность использования различных уравнений деформирования бетона. Задачей данной работы является совершенствование алгоритма [3].

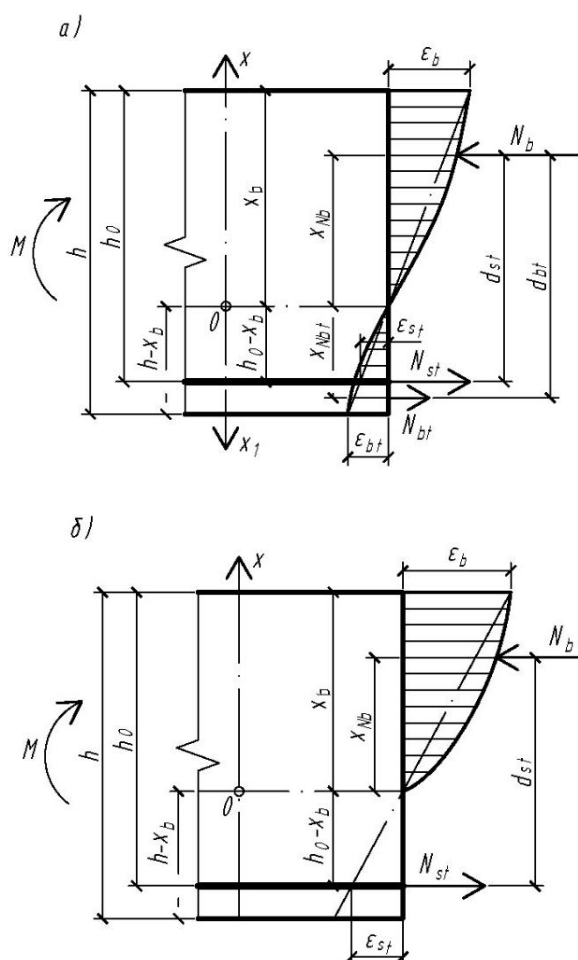


Рисунок 1 – Расчётная модель нормального сечения
а – начальный момент загрузки, б – после образования трещины в растянутом бетоне

Алгоритм описывает поведение деформационной модели нормального сечения изгибаемого

железобетонного элемента размерами $b \times h$ с нижней растянутой арматурой площадью A_s . Графические схемы расчётной модели в начальный момент загрузки и эксплуатационной стадии (после образования трещины) приведены на рисунке 1а,б.

На рисунке 1 использованы следующие обозначения: h_0 – полезная высота сечения; $\varepsilon_{bt}, \varepsilon_{st}, \varepsilon_b$ – деформации растянутого бетона, арматуры, сжатого бетона; x_b – текущая высота сжатой зоны; N_{bt}, N_{st}, N_b – усилия в растянутом бетоне, арматуре, сжатом бетоне; d_{bt}, d_{st} – плечи пар сил N_{bt}, N_{st}, N_b ; x_{Nb}, x_{Nbt} – координаты точек приложения N_b (по оси x), N_{bt} (по оси x_1); M – текущая величина изгибающего момента.

Исходя из геометрии расчётной модели (рисунок 1) зависимость $\sigma - \varepsilon$ для текущей координаты высоты сжатой зоны x_b имеет вид:

$$\sigma_\varepsilon(x) = \sigma\left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x\right) \quad (1)$$

Необходимое условие статического равновесия сечения – равенство проекций усилий на горизонтальную ось [4 - 5]:

$$N_b = N_{st} + N_{bt} \quad (2)$$

Усилие в сжатом бетоне составляет:

$$N_b = \int_0^{x_b} \sigma\left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x\right) \times b \times dx \quad (3)$$

Усилие в растянутой арматуре:

$$N_{st} = \varepsilon_{st} \times E_s \times A_s \quad (4)$$

где E_s – модуль упругости арматуры; остальные обозначения определены выше.

Величина деформаций растянутой арматуры ε_{st} определена исходя из пропорционального отношения с деформацией сжатого бетона ε_b :

$$\frac{\varepsilon_{st}}{h_0 - x_b} = \frac{\varepsilon_b}{x_b} \quad (5)$$

откуда выражена ε_{st} :

$$\varepsilon_{st} = \frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h_0 - x_b) \quad (6)$$

Усилие в растянутом бетоне:

$$N_{bt} = \int_0^{h-x_b} \sigma_{bt}\left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1\right) \times b \times dx \quad (7)$$

Величины d_{bt}, d_{st} определяют геометрически, исходя из схемы рисунка 1.

Автоматизация вычислений осуществлена в следующей последовательности из шести этапов.

1 этап. Вычисление текущей высоты сжатой зоны бетона x_b . Осуществляется на основе равенства (2). После деления обеих частей (2) на N_b и переноса членов в левую часть имеем:

$$\frac{N_b - N_{bt}}{N_{st}} - 1 = 0 \quad (8)$$

Подставляя в (8) выражения (3), (4) и (7), с учётом (5), (6) и решая полученное уравнение относительно x_b получаем величину сжатой зоны на каждом этапе загрузки.

В MathCAD численное решение уравнения (8) реализовано посредством оператора «root» следующим образом:



$$N_{st} \leftarrow \frac{\left(\int_0^{x_b} \sigma \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x \right) \times b \times dx \right) - \int_0^{h-x_b} \left(\sigma_{bt} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) \leq \varepsilon_{bt0} \right) \times 0 \times \text{МПа otherwise} \times b \times dx_1}{\left[\begin{array}{l} \frac{E_s}{E_b} \times \sigma_{bt} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) \right) \times \\ \times A_s \text{if} \frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) < \varepsilon_{bt0} \\ \frac{E_s}{E_b} \times 2 \times R_{bt} \times \\ \times A_s \text{if} \frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) < \varepsilon_{bt0} \\ \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) \right) \times \\ \times E_s \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) \right) \times \\ \times E_s \leq R_s \\ R_s \text{otherwise} \\ \text{otherwise} \\ -1, x_b \end{array} \right] \end{array} \right]}$$

В данном элементе алгоритма для выражения (7) – вычитаемого в числителе дроби – введён дополнительный оператор условия «if – otherwise», учитывающий предел работы бетона растянутой зоны. После достижения растянутым бетоном деформации, соответствующей его предельной растяжимости ε_{bt0} , определяемой по табл. 6.10 [4], он «выключается» из работы, т.е. значение N_{bt} становится равным 0.

В знаменателе дроби – выражении (4) – применён аналогичный оператор условия, учитывающий, во-первых, значения N_{st} до образования трещины, во-вторых, максимально возможное значение усилия в растянутой арматуре, составляющее величину $R_s \times A_s$ (п.8.1.4 [4]). Оператор «if» не позволяет значению (4) превысить значение $R_s \times A_s$, а оператор «otherwise», при превышении N_{st} предельного значения, для последующих шагов сохраняет максимальное усилие в арматуре $R_s \times A_s$.

2 этап. Вычисление усилий в растянутой арматуре. Расчёт выражения (4) полностью аналогичен знаменателю дроби выражения (8) из этапа 1, в среде MathCAD имеет вид:

$$N_{st} \leftarrow \frac{\frac{E_s}{E_b} \times \sigma_{bt} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) \right) \times A_s \text{if} \frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) < \varepsilon_{bt0}}{\left[\begin{array}{l} \frac{E_s}{E_b} \times 2 \times R_{bt} \times A_s \text{if} \frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) < \varepsilon_{bt0} \\ \left[\begin{array}{l} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) \right) \times \\ \times E_s \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times (h-x_b) \right) \times \\ \times E_s \leq R_s \\ R_s \text{otherwise} \\ \text{otherwise} \end{array} \right] \end{array} \right]}$$

3 этап. Вычисление усилий в растянутой зоне бетона. Аналогично этапу 1, для выражения (7), введён оператор «if – otherwise», учитывающий «выключение» растянутого бетона из работы при образовании трещины, в MathCAD имеет вид:

$$N_{bt} \leftarrow \int_0^{h-x_b} \left[\begin{array}{l} \sigma_{bt} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) < \varepsilon_{bt0} \\ R_{bt} \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) = \varepsilon_{bt0} \\ 0 \times \text{МПа otherwise} \end{array} \right] \times b \times dx_1$$

4 этап. Вычисление плеча d_{st} пары сил N_{st} и N_b . Осуществляется геометрически, исходя из рисунка 1,б:

$$d_{st} = x_{Nb} + (h_0 - x_b) \quad (9)$$

Величина x_{Nb} (дробь в данном элементе алгоритма) определена как частное статического момента площади сжатой зоны бетона и её площади. В MathCAD этап имеет вид:

$$d_{st} \leftarrow \frac{\int_0^{x_b} \sigma \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x \right) \times x \times dx}{\int_0^{x_b} \sigma \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x \right) \times dx} + (h_0 - x_b)$$

5 этап. Вычисление плеча d_{bt} пары сил N_{bt} и N_b . Осуществляется геометрически, исходя из рисунка 1,а:

$$d_{bt} = x_{Nbt} + x_{Nb} \quad (10)$$

Величина x_{NB} (первое слагаемое в данном элементе алгоритма) определена как частное статического момента площади растянутой зоны бетона и её площади. Введённый оператор «if – otherwise» учитывает «выключение» растянутого бетона из работы при образовании трещины аналогично этапу 3. Второе слагаемое x_{Nbt} определено аналогично этапу 4. В MathCAD элемент алгоритма имеет вид:

$$d_{bt} \leftarrow \frac{\int_0^{h-x_b} \left[\begin{array}{l} \sigma_{bt} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) < \varepsilon_{bt0} \\ R_{bt} \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) = \varepsilon_{bt0} \\ 0 \times \text{МПа otherwise} \end{array} \right] \times x_1 \times b \times dx_1}{\int_0^{h-x_b} \left[\begin{array}{l} \sigma_{bt} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) < \varepsilon_{bt0} \\ R_{bt} \text{if} \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x_1 \right) = \varepsilon_{bt0} \\ 0 \times \text{МПа otherwise} \end{array} \right] \times b \times dx_1} + \left[\begin{array}{l} (0 \times \text{м}) \text{if} N_{bt} = 0 \\ \frac{\int_0^{x_b} \sigma \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x \right) \times x \times dx}{\int_0^{x_b} \sigma \left(\frac{\varepsilon_b}{x_b} \times x \right) \times dx} \text{otherwise} \end{array} \right]$$

6 этап. Вычисление функции изгибающего момента от деформации крайнего сжатого волокна $M(\varepsilon_b)$. Реализована как сумма моментов усилий N_{st} с плечом d_{st} и N_{bt} с плечом d_{bt} относительно точки приложения усилия N_b . В MathCAD имеет вид:

$$M(\varepsilon_b) = N_{st} \times d_{st} + N_{bt} \times d_{bt}$$



Для работы алгоритма необходимо задать параметры конструктивной схемы сечения (h, h_0, b), прочностные (R_b, R_{bt}, R_s) и деформативные характеристики материалов (E_s, E_b), уравнение деформирования бетона $\sigma_b(\varepsilon_b)$, начальное приближение к вычислению высоты сжатой зоны x_b (для корректного решения уравнения этапа 1 оператором «root»), диапазон и шаг относительных деформаций, для которых требуется построение функции $M(\varepsilon_b)$.

Результаты. В результате работы алгоритма с применением уравнения деформирования бетона [6 — 10] (рис. 2 (а)) формируется график функции $M(\varepsilon_b)$ вида, представленном на рис. 2 (б).

Применённое в работе алгоритма уравнение деформирования бетона [6] имеет вид:

$$\sigma_b(\varepsilon_b) = a_c \times \varepsilon_b^{b_c} \times e^{\frac{-b_c \times \varepsilon_b}{\varepsilon_{b0}}}$$

где ε_{b0} — предельная деформация бетона сжатию, принимаемая по п.6.1.14 [4],

a_c, b_c — коэффициенты, определяемые исходя из решения системы двух уравнений, одно из которых выражает равенство максимальных сжимающих напряжений бетона его временному сопротивлению при достижении деформации ε_{b0} ; второе — равенство модуля упругости бетона E_b на уровне напряжений в 10% от его временного сопротивления [3].

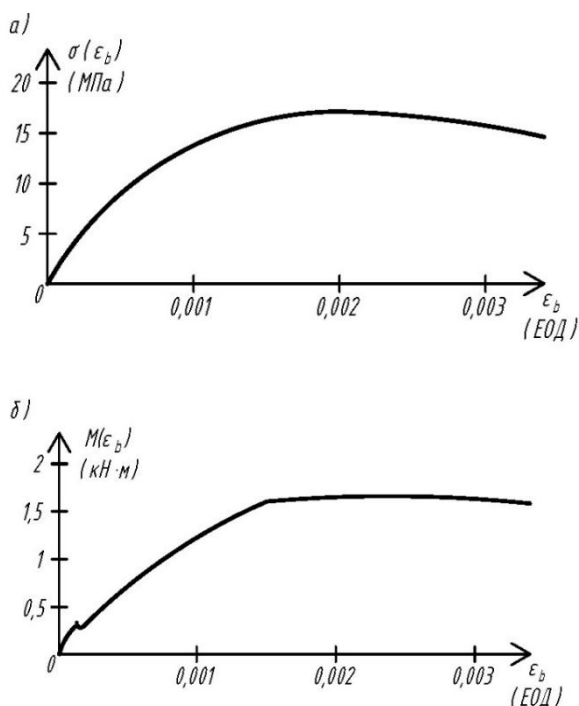


Рисунок 2 — Графики зависимостей $\sigma_b(\varepsilon_b), M(\varepsilon_b)$
а — график уравнения деформирования бетона $\sigma_b(\varepsilon_b)$ [6],
б — график зависимости изгибающего момента от деформации крайнего сжатого волокна бетона $M(\varepsilon_b)$

«Зубец» в начальной части графика $M(\varepsilon_b)$ соответствует моменту образования трещины, т.е. «выключению» из работы части растянутого бетона, де-

формации в которой достигли его предельной растяжимости ε_{bt0} .

Выводы. Усовершенствованный алгоритм [3] при определении НДС изгибаемого железобетонного элемента позволяет:

- учитывать влияние аналитически заданной нелинейной связи деформаций с напряжениями в сжатом и растянутом бетоне;
- определять напряжённо-деформированное состояние изгибаемых железобетонных элементов на всех стадиях их работы;
- оценивать несущую способность нормально и перearмированных сечений по единой методике.

Дальнейшее совершенствование методики, изложенной в [3], предполагает учёт влияния фактора времени в формирование НДС изгибаемого железобетонного элемента.

Библиографический список

1. Лившиц, Я. Д. Расчет железобетонных конструкций с учетом влияния усадки и ползучести бетона [Текст] : [Учеб. пособие для строит. специальностей вузов] / Я. Д. Лившиц, д-р техн. наук, проф. — 2-е изд., перераб. и доп. — Киев : Вища школа, 1976. — 280 с. : ил.; 20 см.
2. Бондаренко В.М. Некоторые вопросы нелинейной теории железобетона [Текст] / издательство Харьковского университета, Харьков, 1968
3. Мурашкин В.Г. Совершенствование конструкции стыка колонны и перекрытия в монолитном безбалочном каркасе // диссертация на соискание уч. степени кандидата технических наук, Самара, СамГАСА, 2002 г.
4. СП 63.13330.2018. Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52 01 2003 (утв. Приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 19 декабря 2018 г. № 832/пр и введен в действие с 20 июня 2019 г.)
5. Железобетонные конструкции: учебн. для вузов в 2 частях. Ч.1. Расчёт конструкций / Э.Н. Кодыш, Н.Н. Трекин, В.С. Федоров, И.А. Терехов. 2-е изд., дополн. и перераб. — М.: Издательство АСВ, 2022. — 388с.
6. Мурашкин В.Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона и визуализация напряженного состояния/ В.Г. Мурашкин, Г.В. Мурашкин // Фундаментальные, поисковые, прикладные, исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации. Москва, 2016. С. 535–543.
7. Мурашкин, В. Г. "Стандартный" и "нестандартный" бетон: моделирование деформаций / В. Г. Мурашкин, Г. В. Мурашкин // Эксперт: теория и практика. — 2019. — № 3(3). — С. 7–12.
8. Козлов, А.В. Модель деформирования бетона для расчета с единых позиций нормально армированных и перearмированных изгибаемых железобетонных конструкций. Автореф. дис. канд. техн. наук. / А.В. Козлов // — Самара, КуИСИ, 2005. — 18 с.
9. Мурашкин Г.В., Мурашкин В.Г. Моделирование диаграммы деформирования бетона и схемы напряженно



— деформированного состояния // Известия Вузов. Строительство, 1997 г., №10.

10. Козлов А.В., Мурашкин В.Г. Расчет изгибаемых железобетонных элементов с применением диаграммы

деформирования // Актуальные проблемы современного строительства: материалы Всероссийской XXXI научно — технической конференции. ПГАСА. Пенза, 2001г.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 24.09.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 24.09.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья

УДК 691.54

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

БАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2025_4_72

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ДОБАВКИ МИКРОКРЕМНЕЗЕМА В СОСТАВЕ ГИПСОЦЕМЕНТНО-ПУЦЦОЛАНОВОГО ВЯЖУЩЕГО ВЕЩЕСТВА

© Авторы, 2025

КРЯЖИКОВ Иван Александрович

аспирант

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(СИБСТРИН)*

(Россия, Новосибирск)

SPIN: 6626-3274

ПИЧУГИН Анатолий Петрович

доктор технических наук, профессор

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(СИБСТРИН)*

(Россия, Новосибирск, e-mail: gmunsau@mail.ru)

Аннотация. В работе исследованы механические и физико-химические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего с добавкой золы уноса и микрокремнезёма. Основное внимание уделено оптимизации состава для повышения прочности, водопоглощения и морозостойкости. Установлено, что прочность на сжатие и изгиб демонстрирует V-образную зависимость от содержания микрокремнезёма, достигая максимума при ~4 % добавки. Превышение оптимального уровня приводит к снижению прочности за счёт увеличения пористости, агломерации частиц и неполной реакции пуццолановой добавки. Разработана методика расчета прогнозной прочности на 2 ч, 7 и 28 суток, а также ориентировочного водопоглощения, что позволило построить трёхмерные графики зависимости прочности и водопоглощения от содержания микрокремнезёма. Полученные данные подтверждают возможность целенаправленной модификации состава для достижения высоких механических характеристик и снижения водопоглощения.

Ключевые слова: гипсоцементно-пуццолановое вяжущее; микрокремнезём; зола уноса; прочность на сжатие; прочность на изгиб; водопоглощение; морозостойкость; V-образная зависимость; оптимизация состава

Для цитирования: Кряжиков И.А., Пичугин А.П. Определение оптимального количества добавки микрокремнезема в составе гипсоцементно-пуццоланового вяжущего вещества // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 72-75. doi:10.51608/26867818_2025_4_72.

Original article

DETERMINATION OF THE OPTIMAL QUANTITY OF MICROSILICA ADDITIVES IN THE COMPOSITION OF A GYPSUM–CEMENT–POZZOLAN BINDER

© The Author(s) 2025

KRYAZHIKOV Ivan Alexandrovich

PhD Candidate

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)
(Russia, Novosibirsk)*

PICHUGIN Anatoly Petrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)
(Russia, Novosibirsk)*

Abstract. This study investigates the mechanical and physicochemical properties of a gypsum–cement–pozzolan binder modified with fly ash and microsilica. The main focus is on optimizing the composition to enhance compressive and flexural strength, water absorption, and frost resistance. It was found that compressive and flexural strength exhibit a V-shaped dependence on microsilica content, reaching a maximum at approximately 4 % addition. Exceeding the optimal amount leads to a decrease in strength due to increased porosity, particle agglomeration, and incomplete pozzolanic reaction. A methodology was developed



to estimate the predicted strength at 2 h, 7 days, and 28 days, as well as approximate water absorption, enabling the construction of 3D graphs showing the dependence of strength and water absorption on microsilica content. The results demonstrate the potential of targeted composition modification to achieve high mechanical performance and reduced water absorption. The study highlights the feasibility of using microsilica in combination with fly ash to produce high-strength and durable gypsum–cement–pozzolan binders, which has practical significance for construction materials.

Keywords: gypsum–cement–pozzolan binder; microsilica; fly ash; compressive strength; flexural strength; water absorption; frost resistance; V-shaped dependence; binder optimization

For citation: Kryazhikov I.A., Pichugin A.P. Determination of the optimal quantity of microsilica additives in the composition of a gypsum–cement–pozzolan binder // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 72-75. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_72.

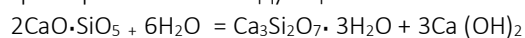
Активные минеральные добавки, используемые в строительных бетонах и растворах, имеют широкий спектр свойств и происхождения, однако наиболее часто применимые связывают с доступностью и экономической целесообразностью. Механизм действия добавок связан с теорией твердения минеральных вяжущих веществ, поэтому все эксперименты и исследования проводятся в сопоставлении с затвердевшими вяжущими с добавками и без них. Исследуя влияние добавок на свойства вяжущих веществ, в качестве основы руководствуются механизмом гидратации и твердения, что способствует дальнейшему расширению знаний в этой области материаловедения.

Существующие тенденции теории и практики твердения минеральных вяжущих могут быть рассмотрены по двум различным положениям: термодинамическому с освещением кристаллохимии и кинетическому, описывающим механизм гидратации при твердении. Первое положение раскрывает промежуточные и конечные продукты фазовых взаимодействий в вяжущем с водой затворения. Особенно сложными представляются процессы твердения в комбинированных гипсоцементных вяжущих с минеральными добавками. В этом случае активные центры добавок выступают инициаторами создания (зарождения) новых структур, что затрудняет фактическую расшифровку последовательности твердения цементогипсового камня с добавками [1-3].

Известно, что скорость возникновения зародышей новых фаз в минеральном вяжущем определяется последовательностью процессов, возникающих при растворении составляющих в воде и формировании данных кристаллов. Это на практике происходит довольно медленно, что позволяет изучить кинетические особенности для каждого рецептурного состава и выявить влияние тех или иных компонентов на скорость происхождения данного процесса [1-3].

Таким образом, изучая кинетику твердения минерального вяжущего с добавками можно путем сравнения определить степень активности конкретной добавки на последующие характеристики бетона или раствора на данном комбинированном вяжущем веществе.

Наиболее важной фазой в портландцементном клинкере является гидратация бели- $\text{та } \beta \cdot 2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($\beta \cdot \text{C}_2\text{S}$) и алита $3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ (C_3S), реакция которых протекает по следующей схеме:



При соблюдении соотношения между CaO и SiO_2 в пределах от 0,8 до 1,5 образуются тонкие плоские структуры, а в случае превышения 1,5 отмечается появление гофрированных или складчатых структур. Однако, следует отметить, что различие структур зависит от ряда сопутствующих факторов, в т.ч. от температуры, наличия излишней воды, степени активности добавок [1; 4-6].

Результаты испытаний гипсоцементно-пуццоланового вяжущего с активной минеральной добавкой показали неудовлетворительные показатели. При использовании композиционного вяжущего на основе гипса, цемента и золы-уноса (в соотношении 44:44:12 %) наблюдается четко выраженная V-образная зависимость прочности от содержания золы [1]. Максимальная прочность достигается при содержании золы около 11 %, после чего отмечается постепенное снижение прочностных показателей. Такая закономерность объясняется балансом между пуццолановой активностью золы и уменьшением доли клинкерной составляющей, обеспечивающей первичное формирование гидратных фаз типа C-S-H (гидросиликатов кальция).

При умеренном количестве золы уноса (10-12%) активная кремнекислая составляющая участвует в реакциях с портландитом, образуя дополнительное количество C-S-H -геля, что способствует уплотнению структуры и росту прочности. Однако при дальнейшем увеличении доли золы содержание гидроксида кальция, выделяющегося в процессе гидратации цемента, становится недостаточным для протекания полноценной пуццолановой реакции. В результате снижается степень связывания $\text{Ca}(\text{OH})_2$, увеличивается пористость и, как следствие, прочность начинает снижаться, а водопоглощение – возрастать. Кроме того, несмотря на положительное влияние золы уноса на долговечность и усадочные характеристики, полученные образцы демонстрируют ограниченную морозостойкость (до F20) и по-



вышенное капиллярное водопоглощение, что свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования структуры композита.

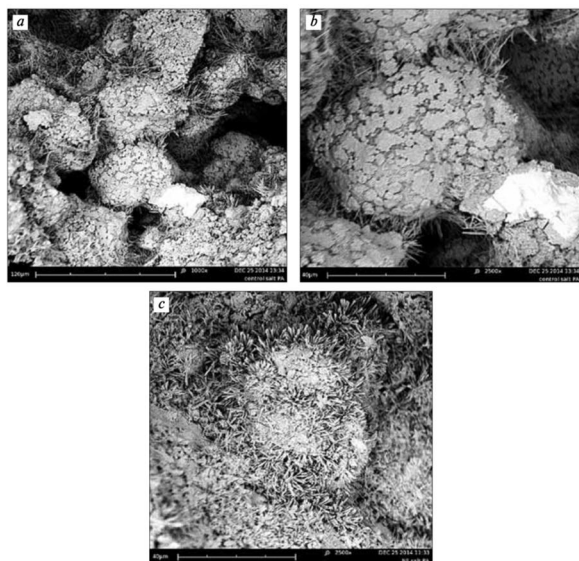


Рисунок 1 - Микроструктура с добавкой дисперсии микрокремнезема (5% от массы вяжущего)

С целью повышения плотности структуры, уменьшения водопоглощения и увеличения морозостойкости рационально ввести добавку микрокремнезема (микросилики) в систему «цемент – зола – гипс» при сохранении постоянного соотношения цемента и золы (1:4) [2]. Добавка микрокремнезема обладает высокой удельной поверхностью и состоит преимущественно из аморфного диоксида кремния, что обеспечивает его реакционную способность. Использование микрокремнезема также может быть обусловлено следующими эффектами[5-8]:

1. пуццолановый эффект – активное взаимодействие с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образование дополнительного C-S-H геля, уплотняющего структуру цементного камня и повышая прочность системы смешанного вяжущего;

2. наполняющий эффект – сверхмелкие частицы микросилики равномерно распределяются в межзерновом пространстве, заполняя микропоры и уменьшая капиллярную проницаемость [3] – Рисунок 1;

Анализ структуры контрольных образцов (рис. 1, а) показывает высокую пористость отформованных изделий. Введение микрокремнезема существенно меняет микроструктуру (рис. 1, с) затвердевшего цементного камня, в котором формируются гидросиликаты кальция игольчатой структуры. Такие изменения микроструктуры можно объяснить большей плотностью вследствие образования дополнительного объема гидросиликатов кальция, их меньшей основностью и снижением общего объема свободного гидроксида кальция.

Для анализа влияния микрокремнезема на свойства ГЦПВ были подобраны 11 составов с шагом добавки кремнезема в 1% от массы гипсового вяжущего, отношение портландцемента к золе-уноса принимаем за постоянную величину, равную 0,25 ч, согласно ТУ 21-31-62-89 [6-10].

Таблица 1 - Составы ГЦПВ с добавкой микрокремнезема

№ п/п	Содержание компонентов, %			
	Гипс Г-5	ЦЕМ II А/Ш 32,5Н	Зола-уноса	Микрокремнезем ООО ЛегоБетон
1.1	44	44	12	0
1.2	43	44	12	1
1.3	42	44	12	2
1.4	41	44	12	3
1.5	40	44	12	4
1.6	39	44	12	5
1.7	38	44	12	6
1.8	37	44	12	7
1.9	36	44	12	8
1.10	35	44	12	9
1.11	34	44	12	10

Таблица 2 - Свойства смешанных вяжущих с добавкой микрокремнезема

№ сост.	Мк, %	В/В	Рсж, МПа			Ризг, МПа		
			2 ч.	7 сут.	28 сут.	2 ч.	7 сут.	28 сут.
1.1	0	0,4	5,1	18,3	20,4	1,8	6,7	7,3
1.2	1	0,4	5,3	18,8	21,0	1,9	6,9	7,5
1.3	2	0,4	5,5	19,3	21,5	2,0	7,0	7,8
1.4	3	0,4	5,7	19,8	22,0	2,1	7,2	8,0
1.5	4	0,4	5,9	20,2	22,4	2,2	7,3	8,2
1.6	5	0,4	5,8	20,0	22,3	2,1	7,2	8,1
1.7	6	0,4	5,6	19,7	22,0	2,0	7,1	7,9
1.8	7	0,4	5,5	19,4	21,8	2,0	7,0	7,8
1.9	8	0,4	5,4	19,1	21,6	1,9	6,9	7,6
1.10	9	0,4	5,3	18,9	21,4	1,9	6,8	7,5
1.11	10	0,4	5,2	18,7	21,2	1,8	6,8	7,4

Экспериментальные данные показали, что при увеличении содержания микрокремнезема прочность гипсоцементно-пуццоланового вяжущего на сжатие и изгиб сначала возрастает, достигая максимума при оптимальной дозировке (~5 % микрокремнезема), а затем постепенно снижается. К основным причинам снижения прочности можно отнести:

1. перераспределение жидкого компонента в составе вяжущих - при высоком содержании сверхмелких частиц увеличивается водопотребность для смачивания поверхности частиц, что уменьшает эффективность гидратации цемента и гипса;

2. агломерация частиц - микрокремнезем и зола склонны к слипанию, образуя локальные дефекты и микропустоты, не участвующие в укреплении структуры[1; 11-12].

Таким образом, наблюдается V-образная зависимость прочности от содержания добавок (Рисунок - 2), где существует оптимальная зона (3–5 % микрокремнезёма или 11–12 % золы уноса), обеспечивающая максимальные механические свойства.

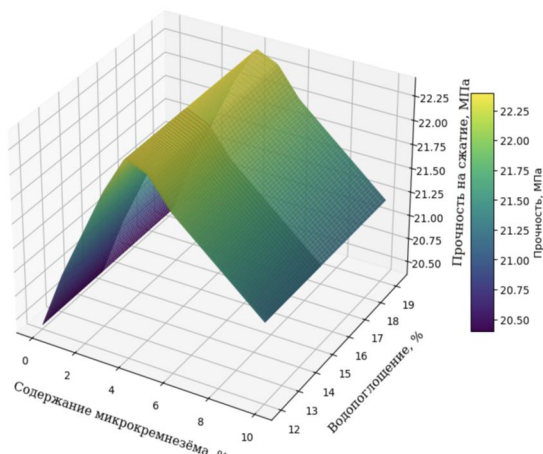


Рисунок 2 - Трехмерная диаграмма: прочность - содержание Мк – водопоглощение

Выводы (заключение). Для дальнейшего повышения прочности гипсоцементно-пущолоановых образцов до 30-35 МПа и обеспечения морозостойкости F150-F200 необходимо проводить целенаправленную оптимизацию состава. Основным фактором улучшения механических и эксплуатационных свойств является введение активных минеральных добавок, таких как микрокремнезём и метакеолин, которые обладают высокой реакционной способностью и способностью заполнять микропоры в цементной матрице. Это способствует увеличению доли образующегося C–S–H-геля, снижению капиллярной пористости и, как следствие, уменьшению водопоглощения.

Помимо добавок, важным направлением является корректировка доли гипса и оптимизация водо–вяжущего отношения, что позволяет увеличить плотность цементного камня и ускорить гидратацию цемента, не ухудшая удобоукладываемость смеси благодаря применению суперпластификаторов. При этом необходимо сохранять установленное соотношение цемента к золе уноса 1:4, чтобы не нарушать пущолоановую активность и химическую стабильность системы. Любое отклонение от этого соотно-

шения может привести к снижению прочности и долговечности материала, несмотря на использование дополнительных добавок.

Библиографический список

1. Ратинов В.Б., Розенберг Т.И. Добавки в бетон. – М.: Стройиздат. – 1989. – 188 с. ISBN 5-274-00566-7
2. Корнеева В.И., Зозуля П.В. Сухие строительные смеси (состав, свойства). – М.: РИФ «Стройматериалы», 2010. – 320 с.
3. Вавржин Ф., Крчма Р. Химические добавки в строительстве. – М.: Стройиздат, 1964 – 288 с.
4. Гипсовые вяжущие с комплексными добавками на основе алюмосиликатов и портландцемента / Н. С. Жукова, А. Н. Жуков, А. Ф. Гордина [и др.] // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – № 1(84). – С. 49-56. – DOI 10.53980/24131997_2022_1_49. – EDN MUNQNM.
5. Зырянов, М. С. Разработка композиционных гипсовых вяжущих с различными активными минеральными добавками / М. С. Зырянов, Е. Н. Потапова // Успехи в химии и химической технологии. – 2018. – Т. 32, № 2(198). – С. 80-82. – EDN SKSPPN.
6. ТУ 21-31-62-89. Гипсоцементнопущолоановое вяжущее. Технические условия.
7. ГОСТ 125 – 2018. Вяжущие гипсовые. Технические условия. – Взамен ГОСТ 125-79; введ. 01.05.19. – М.: Стандартинформ, 2018.– 10 с.
8. Суворова, С. Д. Влияние "eco-friendly" тенденций на поведение потребителей / С. Д. Суворова, М. О. Луканченкова // Инновационная экономика: перспективы развития и совершенствования. – 2020. – № 8(50). – С. 98-103. – DOI 10.47581/2020/PS87/IE/8/50.017. – EDN NIJQXF.
9. Янютин, С. Э. Использование отходов теплоэнергетики в производстве ЖБИ для решения экологических проблем / С. Э. Янютин // Строительные материалы. – 2018. – № 12. – С. 50-54. – DOI 10.31659/0585-430X-2018-766-12-50-53. – EDN YROOOT.
10. ГОСТ 31108 – 2022. Цементы общестроительные. Технические условия.; Взамен ГОСТ 31108-2020; введ. 01.03.21. – Москва.: Стандартинформ, 2021. – 19 с.
11. Дребезгова, М. Ю. Композиционное гипсовое вяжущее многокомпонентными минеральными добавками разного генезиса / М. Ю. Дребезгова, Н. В. Чернышева, С. В. Шаталова // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2017. – № 10. – С. 27-34. – DOI 10.12737/article_59cd0c5892fe38.35639609. – EDN ZOWEQN.
12. Коровяков, В. Ф. Перспективы производства и применения в строительстве водостойких гипсовых вяжущих и изделий / В. Ф. Коровяков // Строительные материалы. – 2008. – № 3. – С. 65-67. – EDN IJPJZD.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья
УДК 691.175
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
БАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2025_4_76

**АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ВЛАЖНОСТНОГО СОСТОЯНИЯ НА ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ
И КИНЕТИКУ НАКОПЛЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ В СТРУКТУРЕ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ
ПОД ДЕЙСТВИЕМ ФАКТОРОВ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ. Часть 1**

© Авторы 2025
SPIN: 7494-0840

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

SPIN: 9332-6318

НИЗИН Дмитрий Рудольфович
кандидат технических наук
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»; НИИСФ РААСН
(Россия, Саранск, e-mail: nizindi@yandex.ru)

SPIN: 5865-8774

ЧИБУЛАЕВ Игорь Александрович
аспирант
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»
(Россия, Саранск, e-mail: chibulaev98@mail.ru)

SPIN: 6486-7164

СПИРИН Илья Петрович
аспирант
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»; НИИСФ РААСН
(Россия, Саранск, e-mail: spirinil2000@yandex.ru)

SPIN: 9739-9569

ПИВКИН Николай Андреевич
магистрант
ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»
(Россия, Саранск, e-mail: 5927401@mail.ru)

Аннотация. Приведены результаты изменения свойств эпоксидных полимеров восьми различных составов в зависимости от длительности натурального климатического воздействия, наличия/отсутствия этапа дополнительной и влагосодержания серий образцов. В качестве исследуемого диапазона влажности было предложено использовать концентрацию влаги на том уровне, который достигается в момент снятия образцов с испытательной площадки (серия «равновесная влажность», условное обозначение «100W»), а также ее отклонение в сторону уменьшения или увеличения, ориентировочно, на 50% (соответственно, серии «50W» и «150W»). Выявлена связь между упруго-прочностными характеристиками и влагосодержанием серий образцов. Подтверждена достаточно высокая стабильность свойств полимера состава Этал-247/Этал-1472, независимо от наличия/отсутствия предварительной термообработки образцов. Выявлено существенное изменение свойств полимера Этал-247/Этал-45TZ2 в зависимости от концентрации влаги в структуре полимера. Установлено значительное снижение характеристик эпоксидного полимера Этал-370/ПЭПА для серий, не подвергшихся дополнительному доотверждению.

Ключевые слова: полимерные материалы; эпоксидные связующие; упруго-прочностные характеристики; влагосодержание предельное влажностное состояние; кинетика накопления повреждений

Благодарности: работа выполнена в рамках реализации Плана фундаментальных научных исследований РААСН и Минстроя России на 2024–2026 гг. (№ 3.1.2.2 «Продолжение исследований механизмов формирования обратимых и необратимых изменений свойств полимерных материалов в процессе натурального климатического старения»).

Для цитирования: Анализ влияния влажностного состояния на изменение свойств и кинетику накопления повреждений в структуре полимерных материалов под действием факторов окружающей среды. Часть 1 / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, И.А. Чибулаев, И.П. Спирин, Н.А. Пивкин // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 76-85. doi:10.51608/26867818_2025_4_76.



ANALYSIS OF THE EFFECT OF MOISTURE CONTENT ON THE CHANGE OF PROPERTIES
AND KINETICS OF ACCUMULATION OF DAMAGES IN THE STRUCTURE OF POLYMER MATERIALS UNDER
THE INFLUENCE OF ENVIRONMENTAL FACTORS. Part 1

© The Author(s) 2025

NIZINA Tatiana Anatolyevna

Doctor of Technical Sciences, Professor

*National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev; NIISF RAACS
(Russia, Saransk, e-mail: nizinata@yandex.ru)*

NIZIN Dmitry Rudolfovich

*Candidate of Technical Sciences National Research Mordovian State University named
after N.P. Ogarev; NIISF RAACS*

(Russia, Saransk, e-mail: nizindi@yandex.ru)

CHIBULAEV Igor Alexandrovich

postgraduate student

*National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev
(Russia, Saransk, e-mail: chibulaev98@mail.ru)*

SPIRIN Ilya Petrovich

postgraduate student

*National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev; NIISF RAACS
(Russia, Saransk, e-mail: spirinil2000@yandex.ru)*

PIVKIN Nikolai Andreevich

master's student

*National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev
(Russia, Saransk, e-mail: 5927401@mail.ru)*

Abstract. The results of changes in the properties of epoxy polymers of eight different compositions are presented, depending on the duration of natural climatic exposure, the presence/absence of an additional stage, and the moisture content of the sample series. As the studied range of humidity, it was proposed to use the moisture concentration at the level that is reached at the moment of removing the samples from the test site (the series "equilibrium humidity", the conventional designation "100W"), as well as its deviation in the direction of reduction or increase, approximately, by 50% (respectively, the series "50W" and "150W"). The relationship between the elastic-strength characteristics and moisture content of the sample series was revealed. The sufficiently high stability of the properties of the polymer composition Etal-247/Etal-1472 has been confirmed, regardless of the presence or absence of pre-treatment of the samples. A significant change in the properties of the polymer Etal-247/Etal-45T22 has been identified, depending on the moisture concentration in the polymer structure.

Keywords: polymer materials; epoxy binders; elastic-strength characteristics; moisture content; ultimate moisture content; damage accumulation kinetics

Acknowledgments: the work was carried out as part of the implementation of the RAASN and the Ministry of Construction of Russia's Plan for Fundamental Scientific Research for 2024-2026 (No. 3.1.2.2 "Continuation of Research on the Mechanisms of Reversible and Irreversible Changes in the Properties of Polymer Materials during Natural Climate Aging").

For citation: Analysis of the effect of moisture content on the change of properties and kinetics of accumulation of damages in the structure of polymer materials under the influence of environmental factors. Part 1 / T.A. Nizina, D.R. Nizin, I.A. Chibulaev, I.P. Spirin, N.A. Pivkin // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 76-85. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_76.

Введение. Анализ кинетики накопления повреждений в процессе механических нагружений, выявление предельного уровня, характеризующего суммарное число накопленных повреждений, достижение которых приводит к разрушению строительных изделий и конструкций, без сомнений, является важ-

ной научной задачей. Усложнение данной задачи связано с воздействием на элементы конструкций агрессивных факторов, в том числе факторов окружающей среды, и механических воздействий [1 – 7].

В работах [3; 6– 8] авторским коллективом была проиллюстрирована методика для оценки кинетики



накопления повреждений в структуре композиционных строительных материалов в процессе нагружения композитов под действием растягивающих и сжимающих нагрузок. Методика основана на использовании методов фрактального анализа кривых деформирования, фиксируемых с высокой частотой снятия показаний (0,01 с). Представленный подход позволяет количественно определить критический уровень накопления микродефектов, приводящих к разуплотнению структуры образца и появлению первых трещин, а также проанализировать последующий этап нагружения вплоть до разрушения образца. Для количественной оценки кинетики накопления повреждений в структуре композиционных материалов под действием механических нагрузений предложено [6] использовать суммарное число отказов, определяемое как отношение числа точек с индексом фрактальности, меньшим 0,5, к общему числу точек кривой деформирования (до достижения уровня максимальных напряжений) и удельный показатель, равный отношению суммарной доли накопленных повреждений к пределу прочности исследуемого образца.

В исследованиях [9 – 10] представлена возможность использования данной методики для оценки воздействия на полимерные образцы циклических нагружений. Выявлен комплекс показателей повреждаемости, расчет которых необходимо проводить в процессе исследований: кинетика накопления повреждений в зависимости от уровня растягивающих напряжений и относительного удлинения [11]; суммарное число отказов при циклическом нагружении и на этапе разрушения, в том числе при фиксированном уровне циклического воздействия; удельные показатели на этапе разрушения и всей истории нагружения.

В работах [12 – 17] на примере полимерных материалов показана необходимость оценки физико-механических характеристик и кинетики накопления повреждений с учетом влажностного состояния образцов: сразу после снятия с испытательной площадки (серия «без кондиционирования»); после увлажнения при относительной влажности $98 \pm 2\%$ до постоянной массы (серия «влагонасыщенные»); после сушки при 60°C до постоянной массы (серия «высушенные»).

Выявлено существенное изменение свойств в зависимости от концентрации влаги в объеме полимерных образцов, а также наличие для ряда исследуемых полимеров после натурального климатического воздействия точки «оптимального» влагосодержания [18]. Показано [5; 14; 19], что влагопоглощение полимерных материалов и связанная с ним потеря прочности определяются структурой и типом полимерной матрицы, составом связующего, степенью отверждения, толщиной и пористостью образцов, а также состоянием межфазного слоя на границе раздела матрица/наполнитель. Следствием химического взаимодействия влаги с полимерными композитами является гидролиз макро-

молекул и последующие реакции деструкции материала. Однако действие влаги проявляется не только в химическом взаимодействии. Вода заполняет собой различные микродефекты, вызывая микрорастрескивание матрицы в местах концентрации остаточных напряжений. Кроме того, поглощенная полимерной матрицей влага может выступать в качестве пластификатора, ослабляя абсорбционные взаимодействия между макромолекулами (или их звеньями) полимера и силу адсорбционного взаимодействия на границе раздела фаз [20 – 23]. Сорбируемая влага активирует процессы структурной релаксации полимерных материалов, оказывает частично обратимое пластифицирующее воздействие, а также участвует в реакциях гидролиза и доотверждения [13].

Методология. В ранее реализованных авторским коллективом исследованиях, результаты которых частично представлены в работах [6; 10; 18], была установлена возможность существенного снижения упруго-прочностных показателей при повышении влагосодержания образцов вплоть до уровня предельного влагонасыщения. При этом экспериментально подтверждено, что предельных уровней влагосодержания в процессе натурального климатического старения эпоксидными образцами не достигается, что связано с постоянным меняющимися периодами увлажнения и высушивания [7]. В данной работе в качестве диапазона влажности было предложено использовать концентрацию влаги на том уровне, который достигается в заданный момент времени натурального экспонирования (серия «равновесная влажность», условное обозначение «100W»), а также ее отклонение в сторону уменьшения или увеличения, ориентировочно, на 50% (соответственно, 50W и 150W). В качестве четвертого уровня влажностного состояния для всех исследуемых серий образцов производилась оценка свойств в высушенном состоянии (серия «dry»).

Также в исследовании была поставлена задача по оценке изменения свойств полимеров, получаемых при дополнительном этапе термической обработки, так называемом доотверждении (ДДО), и без него (без ДДО). Известно, что для полимерных материалов, используемых в строительной отрасли, достаточно часто сложно реализовать этап доотверждения в реальных условиях. При этом многими исследователями доказано [13; 24; 25], что на начальных этапах натурального экспонирования протекает процесс добора прочности (доотверждение) под действием факторов окружающей среды, интенсивность которого существенно зависит от температурно-влажностного режима, что определяется как временем года, так и климатическим районом. Отсутствие учета данного фактора может привести к получению не вполне корректной исходной базы данных, так как для образцов без ДДО на этапах начального экспонирования, результаты которого как раз и фиксируются в качестве входных данных для по-



следующего использования при разработке модели машинного обучения, идут два конкурирующих процесса – повышение прочности в ходе натурального доотверждения и его снижение под действием влаги, сорбируемой из окружающего воздуха, и факторов окружающей среды.

Результаты. В данной работе представлены результаты изменения свойств и кинетики накопления повреждений в эпоксидных полимерах восьми различных составов под действием растягивающих нагрузок. Уровни предельных влагосодержаний (контроль) и серий «dry», «50W», «100W» и «150W» после 14 и 28 суток климатического старения приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Значения влагосодержания исследуемых составов эпоксидных полимеров в контрольном состоянии (предельное влагонасыщение) и после натурального климатического воздействия в течение 14 и 28 суток (серии «dry», «50W», «100W», «150W»)

№	Состав	Предельное влагосодержание (контроль), %	Серия	Длительность климатического воздействия, сутки			
				14	28	14	28
				ДДО*		без ДДО**	
1	Этал-247/ Этал-1472	2,6	dry	0,089	0,120	0,096	0,108
			50W	0,380	0,391	0,351	0,346
			100W	0,543	0,642	0,613	0,667
			150W	0,727	0,919	0,808	0,940
2	Этал-247/ Этал-1400H	4,54	dry	0,102	0,113	0,092	0,109
			50W	0,471	0,438	0,487	0,500
			100W	0,696	0,809	0,818	0,924
			150W	0,983	1,194	1,070	1,345
3	Этал-247/ Этал-45TZ2	4,45	dry	0,081	0,106	0,075	0,093
			50W	0,453	0,433	0,517	0,511
			100W	0,728	0,842	0,836	0,940
			150W	0,973	1,225	1,161	1,400
4	Этал-247/ Этал-УФ3D	1,45	dry	0,099	0,113	0,098	0,111
			50W	0,472	0,463	0,391	0,580
			100W	0,649	0,877	0,795	0,966
			150W	0,885	1,241	1,066	1,414
5	Этал-247/ ПЭПА	3,73	dry	0,074	0,095	0,066	0,092
			50W	0,371	0,312	0,316	0,349
			100W	0,490	0,564	0,526	0,614
			150W	0,664	0,815	0,714	0,908
6	Этал-370/ Этал-45M	2,4	dry	0,069	0,095	0,082	0,110
			50W	0,348	0,297	0,365	0,290
			100W	0,423	0,485	0,504	0,571
			150W	0,562	0,736	0,678	0,814
7	Этал-370/ ПЭПА	3,7	dry	0,081	0,105	0,086	0,119
			50W	0,241	0,406	0,183	0,265
			100W	0,414	0,529	0,386	0,441
			150W	0,546	0,686	0,518	0,693
8	ЭД-20/ Этал-М7	4,1	dry	0,091	0,104	0,087	0,102
			50W	0,364	0,394	0,253	0,413
			100W	0,527	0,670	0,608	0,712
			150W	0,693	0,936	0,819	1,046

* доотверждение образцов при температуре 80°C в течение 6 часов;

** без этапа доотверждения.

Учитывая, что в процессе сушки или влагонасыщения до определенного уровня достаточно сложно достигать полного попадания в заданное числовое значение, для каждого исследуемого образца производилась оценка фактического влагосодержания непосредственно перед испытанием. Графическая интерпретация расчетных и фактических уровней влагосодержания (средние значения) исследуемых серий после натурального климатического старения в умеренно континентальном климате в течение 14 и 28 суток представлена на рисунке 1.

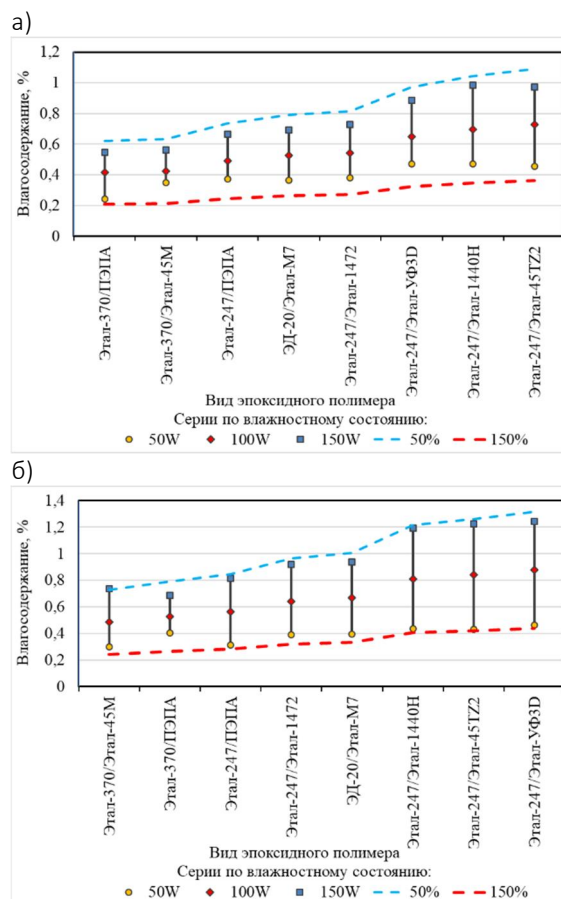


Рисунок 1– Расчетные и фактические уровни влагосодержания исследуемых эпоксидных полимеров после 14 (а) и 28 (б) суток натурального климатического старения в условиях умеренно континентального климата (порядок упоминания – по возрастанию влагосодержания серий «100W, ДДО»)

Изменение влагосодержания образцов серий «100» в процессе натурального климатического старения (в момент снятия с испытательной площадки) относительно предельных уровней влагосодержания варьируется в интервале 10,4÷25,6%, что подтверждает ранее сделанный вывод о недостижении образцами в ходе натурального климатического старения предельных значений (рис. 2). Исключение составляет полимер состава Этал-247/Этал-УФ3D, впервые введенный в блок для натуральных испытаний. Доля



фактического влагосодержания относительно предельного для данного полимера варьируется в интервале от 44,8 до 66,5%, что требует продолжения натурных исследований с учетом варьирования изменения массы в ходе климатического воздействия.

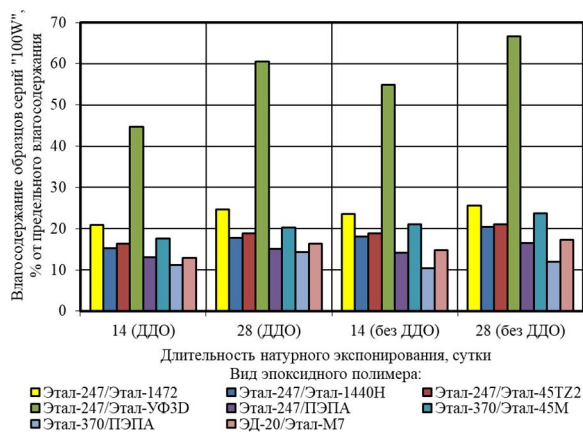


Рисунок 2 – Влагосодержание образцов серий «100» восьми исследуемых полимеров для разных временных интервалов (с ДДО и без ДДО)

Анализ представленных на рисунках 3 – 4 корреляционных зависимостей между упруго-прочностными показателями (предел прочности и модуль упругости при растяжении) и влагосодержанием позволяет проследить область локализации экспериментальных точек для каждого из восьми видов исследуемых полимеров в отдельности. Для удобства анализа все графические зависимости представлены в одних и тех же диапазонах варьирования. Также на каждый график нанесен уровень предельного влагосодержания (штриховая вертикальная линия голубого цвета), что позволяет оценить степень влагонасыщения (по сравнению с предельным) в момент испытания. Для анализа возможных вариантов аппроксимации для каждого вида полимера построены линейные и экспоненциальные зависимости изменения свойств в зависимости от влагосодержания, объединяющие результаты исследований, полученные через 14 и 28 суток натурального экспонирования, в том числе без ДДО.

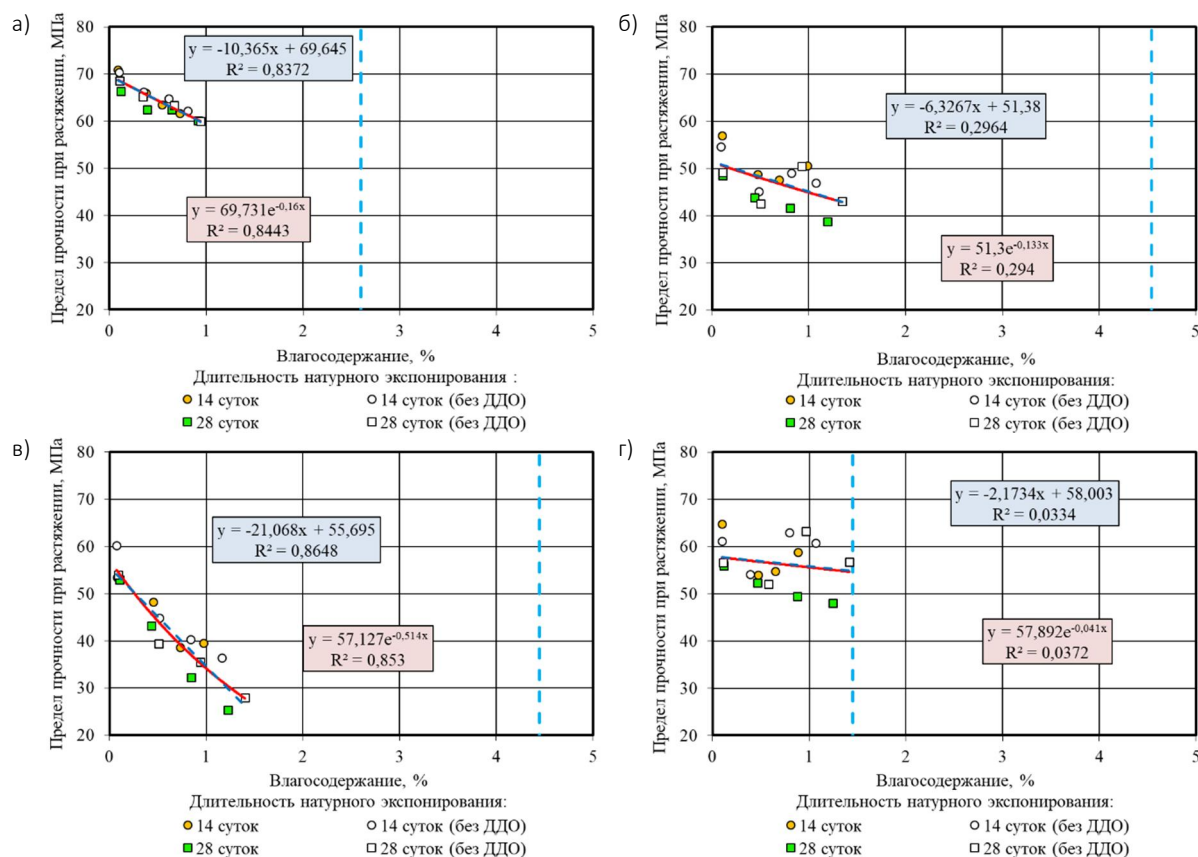


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости между пределом прочности при растяжении и влагосодержанием серий образцов полимеров: а – Этал-247/Этал-1472; б – Этал-247/Этал-1440Н; в – Этал-247/Этал-45ТЗ2; г – Этал-247/УФ3Д

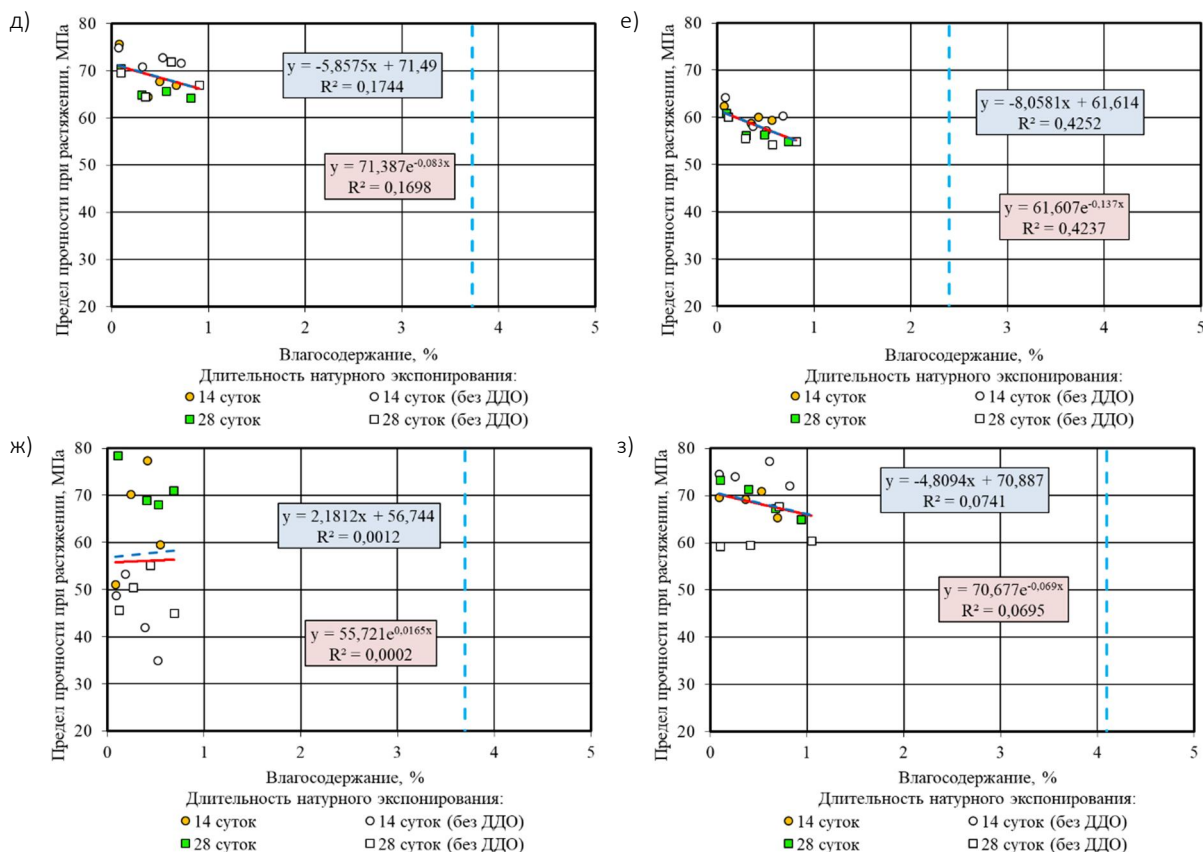


Рисунок 3 – Корреляционные зависимости между пределом прочности при растяжении и влагосодержанием серий образцов полимеров:
д – Этал-247/ПЭПА; е – Этал-370/Этал-45М; ж – Этал-370/ПЭПА; з – ЭД-20/Этал-М7

Установлено существенное варьирование свойств с увеличением влагосодержания в структуре образцов в зависимости от вида полимерного связующего. Наименьшее изменение предела прочности (рис. 3) и модуля упругости (рис. 4) при растяжении в исследуемом интервале с явно выраженной зависимостью от влагосодержания серий образцов наблюдается для полимеров Этал-247/Этал-1472 и Этал-370/Этал-45М.

Наибольшим снижением свойств характеризуется полимер состава Этал-247/Этал-45Т22, для которого повышение концентрации влаги в структуре полимера до 1,4% приводит к снижению предела прочности в интервале от 60,2 до 25,4 МПа (рис. 3). Для полимера состава Этал-370/ПЭПА не прослеживается зависимости изменения свойств от влагосодержания; в данном случае более ярко видно существенное изменение свойств в зависимости от нали-

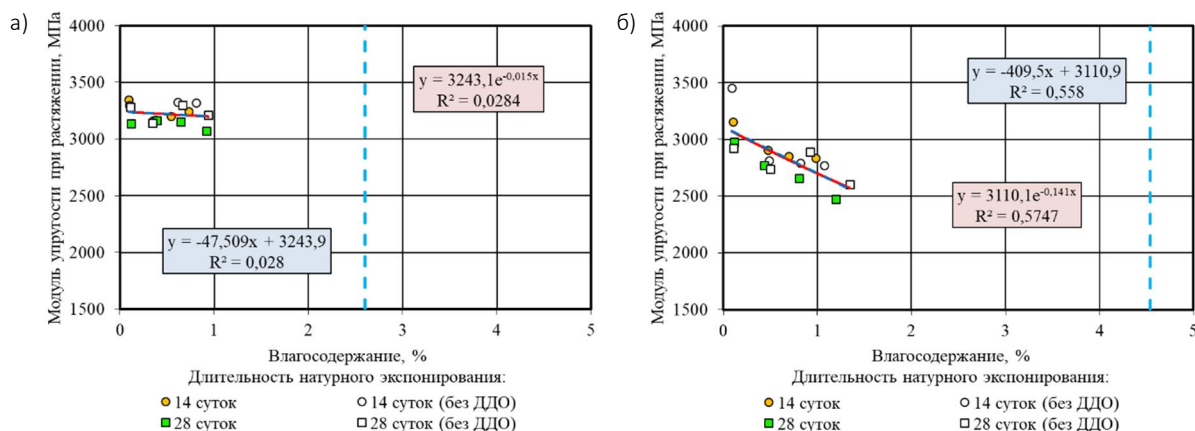


Рисунок 4 – Корреляционные зависимости между модулем упругости при растяжении и влагосодержанием серий образцов полимеров:
в – Этал-247/Этал-45Т22; г – Этал-247/УФ3Д; д – Этал-247/ПЭПА; е – Этал-370/Этал-45М;
ж – Этал-370/ПЭПА; з – ЭД-20/Этал-М7 (начало)

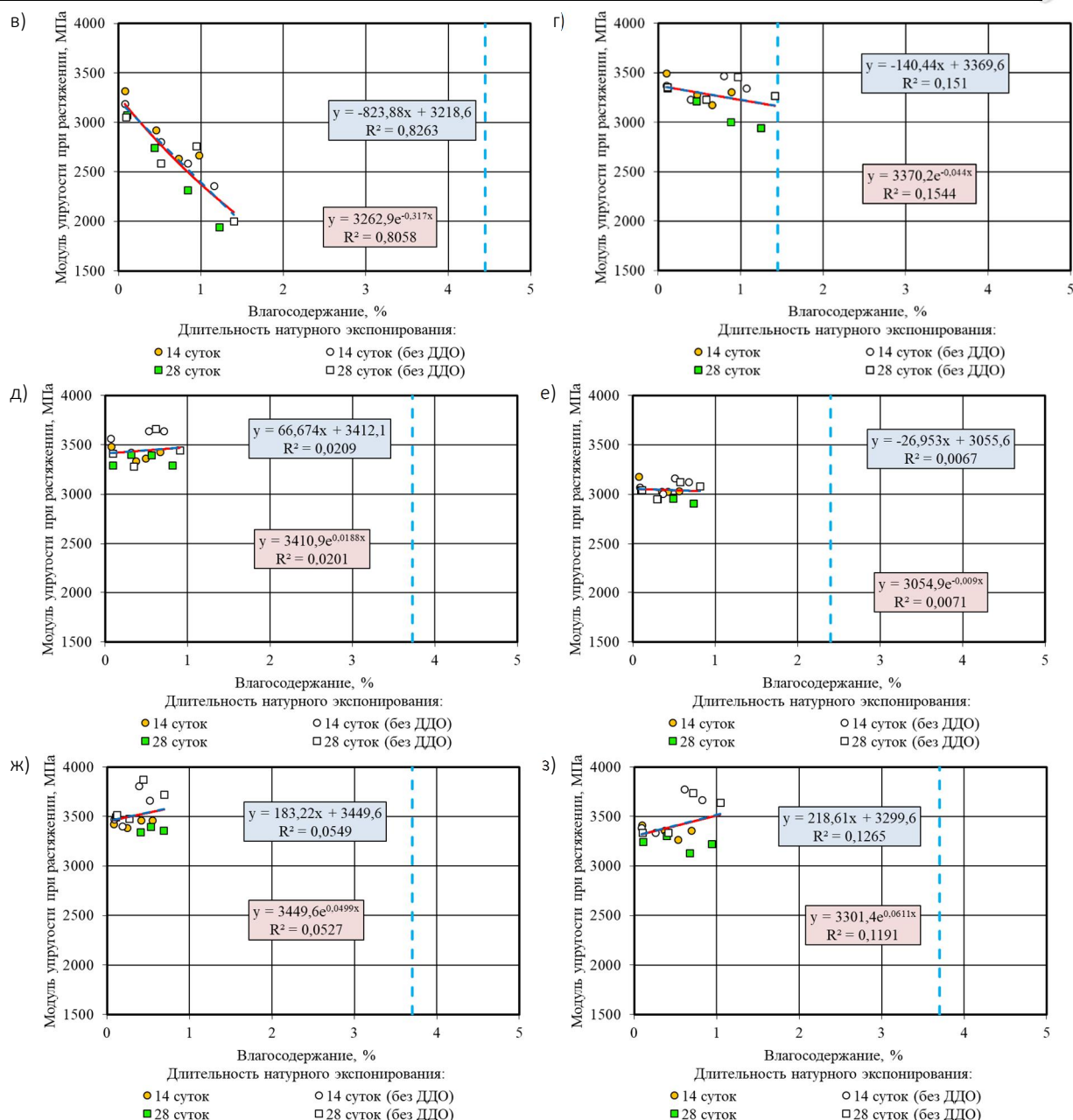


Рисунок 4 – Корреляционные зависимости между модулем упругости при растяжении и влагосодержанием серий образцов полимеров: в – Этал-247/Этал-45Т22; г – Этал-247/УФ3D; д – Этал-247/ПЭПА; е – Этал-370/Этал-45М; ж – Этал-370/ПЭПА; з – ЭД-20/Этал-М7 (окончание)

чия или отсутствия дополнительного этапа доотверждения. В частности, для отвержденных серий образцов изменение свойств составляет от 51,1 до 78,4 МПа, а для неотвержденных – снижается до 35,0÷55,1 МПа. Очевидно, что для полимера Этал-370/ПЭПА необходимо внимательно контролировать область применения, особенно если в дальнейшем нет возможности провести дополнительное отверждение.

В ходе экспериментальных исследований для каждой серии эпоксидных полимеров был проведен анализ кинетики накопления повреждений в процессе приложения растягивающих нагрузок. Для об-

работки экспериментальных данных использовался авторский программный комплекс, написанный на языке Python [11]. Графическая интерпретация полученных результатов, сгруппированных для четырех различных уровней влагосодержания (серии «dry», «50W», «100W», «150W»), на примере полимера Этал-247/Этал-45Т22 представлена на рисунке 5. Выявлено изменение скорости накопления повреждений в зависимости от уровня влажностного состояния, длительности натурального экспонирования и наличия/отсутствия дополнительного этапа доотверждения. При этом суммарное число накопленных повреждений варьируется для всех исследуемых по-

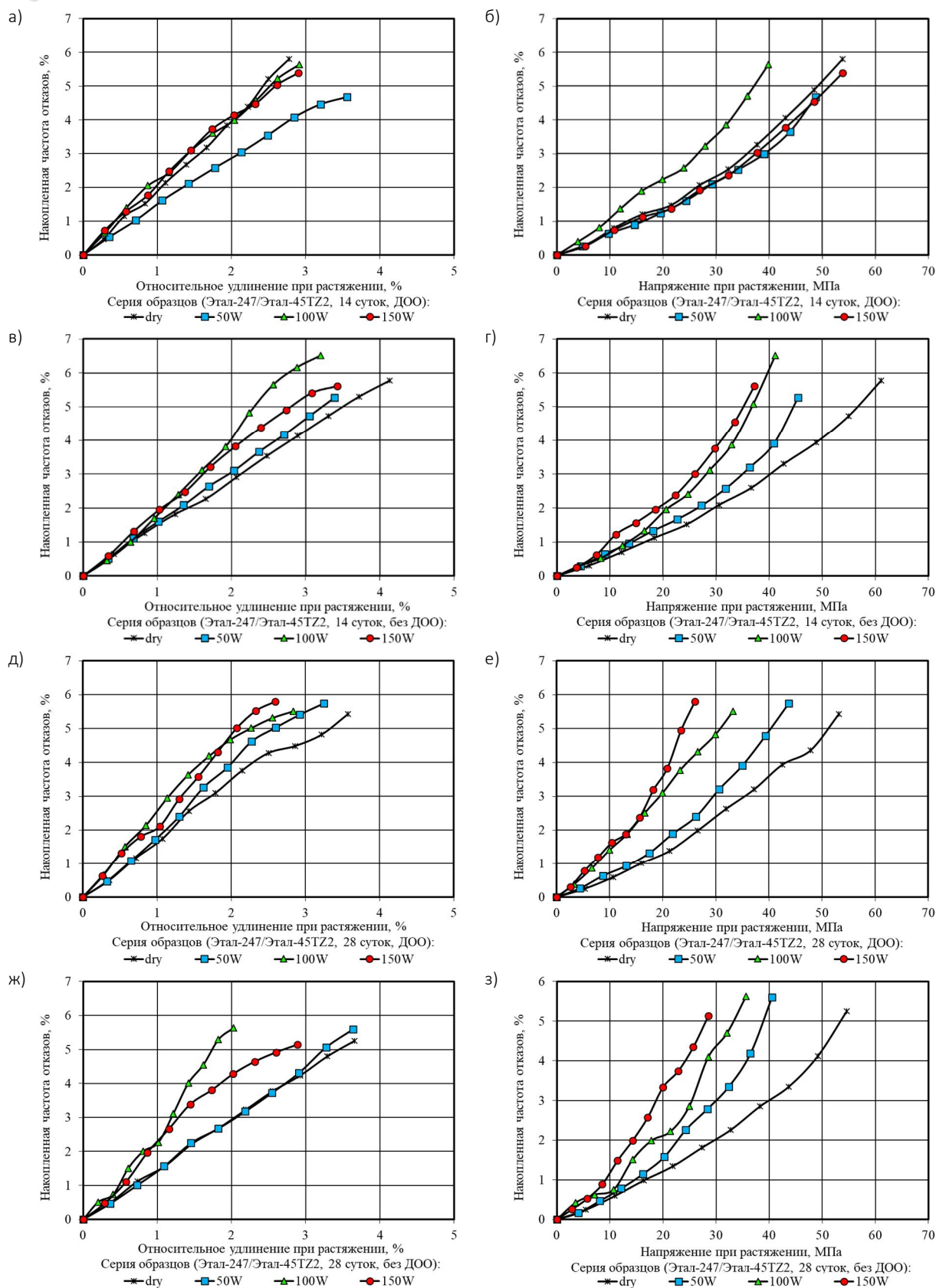


Рисунок 5 – Кинетика накопления повреждений в структуре эпоксидного полимера состава Этал-247/Этал-45TZ2 в зависимости от относительного удлинения (а, в, д, ж) и напряжения (б, г, е, з) при растяжении для четырех серий образцов («dry», «50W», «100W» и «150W») после воздействия факторов окружающей среды в течение 14 (а – г) и 28 (д – з) суток (а, б, д, е – после ДДО; в, г, ж, з – без ДДО)

лимеров в интервале от 4,2 до 6,5%. Учитывая значи-



тельные объемы формируемых экспериментальных данных, следующий этап исследований был посвящен моделированию кинетики накопления повреждений в зависимости от относительного удлинения и напряжения при растяжении после климатического воздействия различной продолжительности, в том числе для серий после и без дополнительного доотверждения. Результаты реализованного моделирования будут представлены в публикации с одноименным названием (часть 2).

Выводы. Проведенный в рамках экспериментального исследования анализ изменения свойств восьми составов эпоксидных полимеров позволил установить особенности влияния влагосодержания на изменение предела прочности и модуля упругости при растяжении. Из представленных данных четко видна степень связи между упруго-прочностными показателями и влагосодержанием, а также разброс характеристик в зависимости от длительности климатического воздействия и наличия/отсутствия этапа ДДО.

Библиографический список

1. Бондарь, В.С. Математическое моделирование процессов деформирования и накопления повреждений при циклических нагружениях / В.С. Бондарь, В.В. Даншин, Д.А. Макаров // Вестник ПНИПУ. Механика. – 2014. – №2. – С. 125–152.
2. Гоц А. Н. Обзор моделей усталостного разрушения при циклическом нагружении / А.Н. Гоц, С.А. Гликин // Фундаментальные исследования. – 2016. – № 9 (часть 3). – С. 478–482.
3. Низина, Т.А. Влияние влажностного состояния на кинетику накопления повреждений в структуре образцов эпоксидных полимеров под действием растягивающих напряжений / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, Н.С. Канаева, Д.А. Климентьева, А.А. Порватова // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 1. – С. 37–45.
4. Казаков Д. А. Моделирование процессов деформирования и разрушения материалов и конструкций : монография / Д.А. Казаков, С.А. Капустин, Ю.Г. Коротких. – Н. Новгород : Изд-во Нижегородского гос. ун-та, 1999. – 226 с.
5. Исследование влияния климатических факторов и механического нагружения на структуру и механические свойства ПКМ / В.Н. Кириллов, В.А. Ефимов, А. К. Шведкова, Е. В. Николаев // Авиационные материалы и технологии. – 2011. – №4 (21). – С. 41–45.
6. Низина, Т. А. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате: монография / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин – Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2020. – 188 с.
7. Селяев, В.П. Фрактальный анализ кривых деформирования дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов при сжатии / В.П. Селяев, Т.А. Низина, А.С. Балыков, Д.Р. Низин, А.В. Балбакин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2016. – № 1. – С. 129–146. DOI: 10.15593/perm.mech/2016.1.09
8. Nizina, T.A. Applying the Fractal Analysis Methods for the Study of the Mechanisms of Deformation and Destruction of Polymeric Material Samples Affected by Tensile Stresses / T.A. Nizina, D.R. Nizin, N.S. Kanaeva, N.M. Kuznetsov, D.A. Artamonov // Key engineering materials. – 2019. – Vol. 799. – Pp. 217–223. Doi: 10.4028/www.scientific.net/KEM.799.217.
9. Nizin, D.R. Kinetics of Failure Accumulation in Polymers under the Cyclic Loads / D.R. Nizin, T.A. Nizina, N.S. Kanaeva // AIP Conference Proceedings 2497, 040017 (2023). Doi: 10.1063/5.0104894.
10. Низина, Т.А. Методика оценки кинетики накопления повреждений в структуре полимерных материалов под действием циклических нагрузок / Т.А. Низина, В.П. Селяев, Д.Р. Низин, Н.С. Канаева, И.А. Чибулаев // Механика разрушения строительных материалов, изделий и конструкций: сборник научных статей по материалам заседания Научного совета Российской академии архитектуры и строительных наук. – Саранск, 2024. – С. 57–64.
11. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2022612647. Расчет локальных и интегрального индексов фрактальности кривых деформирования образцов полимерных материалов / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, Н.С. Канаева // № 2022611934 ; Заявл. 15.02.2022; Опубл. 28.02.2022, Бюл. № 3.
12. Старцев, В.О. Методы исследования старения полимерных связующих В.О. Старцев // Клеи. Герметики. Технологии. – 2020. – №9. – С. 16–26.
13. Старцев, В.О. Обратимые эффекты влияния влаги при определении механических свойств ПКМ при климатических воздействиях // В.О. Старцев, В.И. Плотноков, Ю.В. Антипов // Труды ВИАМ. – 2018. – №5. – С. 110–118.
14. Старцев В.О., Панин С.В., Старцев О.В. Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями // Механика композитных материалов. 2015. № 6.С. 1081–1094.
15. Каблов, Е.Н. Старение полимерных композиционных материалов / Е.Н. Каблов, В.О. Старцев, А.Б. Лаптев. М.: НИЦ «Курчатовский институт» – ВИАМ, 2023. – 536 с.
16. Каблов, Е.Н. Системный анализ влияния климата на механические свойства полимерных композиционных материалов по данным отечественных и зарубежных источников (обзор) // Е.Н. Каблов, В.О. Старцев // Авиационные материалы и технологии. – 2018. – № 2. – С. 47–58.
17. Низина, Т.А. Влияние натурного климатического воздействия факторов окружающей среды на кинетику накопления повреждений в структуре полимерных материалов на основе эпоксидных связующих / Т.А. Низина, Д.Р. Низин, И.П. Спирин, И.А. Чибулаев, Н.А. Пивкин // Целостность и ресурс в экстремальных условиях: всероссийская конференция, посвященная 75-летию Якутского Научного Центра СО РАН. – Якутск, 2024. – С. 238–241.
18. Низин, Д.Р. Учет влажностного состояния полимерных материалов при разработке моделей машинного обучения / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, И.П. Спирин // Строительные материалы. – 2024. – №12. – С. 57–67.
19. Startsev V.O., Il'ichev A.V. Effect of mechanical impact energy on the sorption and diffusion of moisture in re-



inforced polymer composite samples on variation of their sizes // *Mechanics of Composite Materials*. – 2018. – Т. 54. – № 2. – Рр. 145-154.

20. Каблов, Е.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. I. Механизмы старения / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // *Деформация и разрушение материалов*. – 2010. – №11. – С. 19-27.

21. Каблов, Е.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. II. Релаксация исходной структурной неравномерности и градиент свойств по толщине / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // *Деформация и разрушение материалов*. Москва, - 2010. – №12. – С. 40-46.

22. Каблов, Е.Н. Климатическое старение композиционных материалов авиационного назначения. III. Значимые факторы старения / Е.Н. Каблов, О.В. Старцев, А.С. Кротов, В.Н. Кириллов // *Деформация и разрушение материалов*. – 2011. – № 1. – С. 34-40.

23. Кириллов, В.Н. К вопросу о возможности прогнозирования атмосферной стойкости ПКМ / В.Н. Кириллов, В.А. Ефимов, Ю.М. Вапиров // В сб. докл. VII Международной науч. конф. по гидроавиации «Гидросалон-2008». Москва, 2008. – Ч.1. – С. 307-313.

24. Старцев, В.О. Обратимое воздействие влаги на механические свойства эпоксидных полимеров при климатическом старении/ В.О. Старцев, Т.А. Низина // *Фундаментальные исследования и последние достижения в области защиты от коррозии, старения и биоповреждений материалов и сложных технических систем в различных климатических условиях*. ФГУП ВИАМ, 2016. режим доступа: <https://conf.viam.ru/conf/194/proceedings>.

25. Низин, Д.Р. Обратимое и необратимое изменение свойств полимерных материалов в процессе натурального климатического старения / Д.Р. Низин, Т.А. Низина, В.П. Селяев, Н.С. Канаева // *Умные композиты в строительстве*. – 2022. – Т. 3. – №1. – С. 18-29.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 02.11.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 02.11.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья

УДК 69.04

ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура

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

doi:10.51608/26867818_2025_4_86

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЗАБИВНЫХ СВАЙ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© Авторы 2025

SPIN:2996-1425

НИКОЛЮКИН Алексей Николаевич

кандидат технических наук, старший преподаватель

кафедры «Конструкции зданий и сооружений»

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: valax1@yandex.ru)

SPIN: 4048-5225

АНТОНОВ Василий Михайлович

кандидат технических наук, доцент кафедры

«Конструкции зданий и сооружений»

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: antonov280562@mail.ru)

SPIN: 8674-6046

МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович

член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, доцент,

директор Института архитектуры, строительства и транспорта

РААСН; Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: monastirev68@mail.ru)

SPIN: 8674-6046

ЕЗЕРСКИЙ Валерий Александрович

доктор технических наук, профессор

кафедры «Архитектура и градостроительство»

(Россия, Тамбов, e-mail: wiz75micz@rambler.ru)

SPIN: -

ЛИСОВСКИЙ Владислав Александрович

студент магистратуры кафедры КЗиС

Тамбовский государственный технический университет

(Россия, Тамбов, e-mail: Artas525@yandex.ru)

Аннотация. Предложен подход к прогнозированию несущей способности свайных оснований на основе нейронных сетей. Моделируются две нормативно значимые величины: расчётное сопротивление грунта под нижним концом сваи $R(I_L, h)$ и расчетное сопротивление на боковой поверхности $f(I_L, h)$. Дефицит исходных данных, присущий табличным нормам, компенсирован генерацией синтетических наблюдений методом интерполяции по таблицам СП 24.13330.2021. Архитектура сетей обеспечивают физическую корректность (ожидаемую монотонность по I_L, h); обучение выполнялось при помощи функции потерь с учётом монотонной регуляризации. Проведена верификация по независимым наборам. Полученные результаты демонстрируют высокую сходимость с нормативными значениями и инженерную пригодность моделей для оперативной оценки несущей способности в условиях ограниченной исходной информации. Подход может использоваться как самостоятельный инструмент предварительных расчётов и как генератор синтетических выборок для последующего обучения более сложных моделей.

Ключевые слова: свайные фундаменты; несущая способность; расчётное сопротивление грунта; показатель текучести; нейронные сети

Для цитирования: Прогнозирование несущей способности забивных свай на основе нейронных сетей / А.Н. Николюкин, В.М. Антонов, П.В. Монастырев, В.А. Езерский, В.А. Лисовский // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 86-97. doi:10.51608/26867818_2025_4_86.



Original article

PREDICTION OF LOAD-BEARING CAPACITY OF DRIVEN PILES BASED ON NEURAL NETWORKS

©The Author(s) 2025

NIKOLYUKIN Alexey Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer at the Department of Building and Structure Design
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov, e-mail: valax1@yandex.ru)

ANTONOV Vasily Mikhaylovich

Candidate of Technical Sciences, senior lecturer the Department of Building and Structure Design
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov, e-mail: antonov280562@mail.ru)

MONASTYREV Pavel Vladislavovich

Corresponding Member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, and Director of the Institute of Architecture, Construction, and Transportation
RAACS; Tambov State Technical University
(Russia, Tambov, e-mail: monastyrev68@mail.ru)

EZERSKY Valery Aleksandrovich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Architecture and Urban Planning
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov, e-mail: wiz75micz@rambler.ru)

LISOVSKY Vladislav Aleksandrovich

Master's student of the Department of Construction Management and Engineering Surveys
Tambov State Technical University
(Russia, Tambov, e-mail: Artas525@yandex.ru)

Abstract. An approach to predicting the load-bearing capacity of pile foundations based on neural networks is proposed. Two normatively significant values are modeled: calculated soil resistance under the lower end of the pile $R(I_L, h)$ and calculated resistance along the side surface $f(I_L, h)$. The lack of initial data inherent in tabular norms is compensated by generating synthetic observations using interpolation methods according to SP 24.13330.2021 tables. Network architectures ensure physical correctness (expected monotonicity with respect to I_L and h), while training was carried out using a loss function that takes into account monotone regularization. Verification has been performed on independent datasets. The obtained results demonstrate high convergence with normative values and engineering applicability of models for rapid assessment of bearing capacity under conditions of limited initial information. This approach can be used as an independent tool for preliminary calculations and as a generator of synthetic samples for subsequent training of more complex models.

Keywords: pile foundations, bearing capacity, soil bearing resistance, plasticity index, neural networks

For citation: Prediction of load-bearing capacity of driven piles based on neural networks / A.N. Nikolyukin, V.M. Antonov, P.V. Monastyrev, V.A. Ezersky, V.A. Lisovsky // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 86-97. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_86.

Введение. Несущая способность свайных фундаментов является ключевым параметром при проектировании зданий и сооружений, однако ее точное определение затруднено из-за ограниченности полевых испытаний и разрозненности данных. В нормативных базах присутствуют лишь табличные

значения расчетных сопротивлений грунтов под нижним концом сваи (величина R) и на боковой поверхности (f) для отдельных категорий грунтов, что создает дефицит исходных данных при попытке охватить все возможные свойства грунтов и глубину погружения свай. Для преодоления этого недостатка



возможно применять синтетические выборки данных, сгенерированные на основе нормативных зависимостей путем интерполяции, а также использовать современные методы моделирования – в частности, нейронные сети – для приближенного вычисления несущей способности.

В данной работе расчетное сопротивление под нижним концом и на боковой поверхности определяется по значению показателя текучести I_L грунта как ключевому входному параметру модели. Показатель текучести – безразмерная величина, характеризующая консистенцию глинистых грунтов, рассчитываемая на основе соотношения естественной влажности грунта и границ пластичности и текучести. Согласно ГОСТ 25100–2020, значения I_L позволяют классифицировать состояние глинистого грунта: например, при $I_L < 0$ грунт считается твердым, $I_L = 0.25$ соответствует полутвердому состоянию, $I_L = 0.50$ – тугопластичному, $I_L = 0.75$ – мягкопластичному, а $I_L > 1.00$ – текучему состоянию грунта [1]. Показатель текучести отражает снижение прочностных свойств грунта по мере увеличения влажности и пластичности. При создании модели этот показатель являлся главной переменной, определяющей расчетные сопротивления грунта R и f для различных геологических условий.

В качестве инструмента моделирования применены многослойные нейронные сети, обученные на нормативных данных (в том числе синтетических, полученных интерполяцией табличных значений). Такой подход позволяет непрерывно аппроксимировать зависимость несущей способности от параметров грунта, обеспечивая при этом соблюдение физических ограничений (монотонность изменений R и f при изменении I_L и глубины). В статье приводятся структура используемых данных, архитектура и особенности обучения нейросетевых моделей, а также результаты их применения для прогноза несущей способности свай. Отдельное внимание уделено проверке монотонности аппроксимаций и сравнению различных методов интерполяции (кубического сплайна и монотонной интерполяции РСНП). В заключение обсуждаются области применимости разработанных моделей, их ограничения и практические рекомендации по использованию в инженерной практике.

Обзор нормативных документов. Для оценки несущей способности свай в РФ используются нормы, заложенные в актуализированном своде правил СП 24.13330.2021 «Свайные фундаменты» (обновленная редакция СНиП 2.02.03–85) [1]. В этом документе регламентированы полевые и аналитические методы определения несущей способности забивных свай. Расчетная формула для определения несущей способности одиночной сваи при статическом нагружении имеет вид:

$$F_d = \gamma_c (\gamma_{R,R} R A + \gamma_{R,f} u \sum_{i=1}^n f_i h_i) \quad (1)$$

где R – расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи (кПа); A – площадь опирания сваи на грунт (м^2); f_i – расчетное сопротивление грунта на боковой поверхности сваи в i -м слое (кПа); h_i – толщина i -го слоя грунта, прорезанного свайей (м); u – периметр сечения сваи (м); γ_c – коэффициент условий работы сваи; $\gamma_{R,R}$ и $\gamma_{R,f}$ – коэффициенты условий работы грунта под нижним концом и на боковой поверхности соответственно [1–8]. В данной формуле сумма $\sum_{i=1}^n f_i h_i$ представляет собой интегральное сопротивление грунта по боковой поверхности ствола, возрастающей по мере погружения сваи через различные слои грунта. Соответственно, первая часть $\gamma_{R,R} R A$ характеризует силу сопротивления под нижним концом сваи, а вторая часть $\gamma_{R,f} u \sum_{i=1}^n f_i h_i$ – сопротивление трению на боковой поверхности ствола. Коэффициент γ_c учитывает условия работы сваи в грунте (например, характер нагрузки – сжимающая или выдергивающая, наличие наклона свай в кусте и др. согласно СП). В расчетах проектировщики обычно принимают $\gamma_c = 1.0$ для центрально нагруженных вертикальных свай, а коэффициенты $\gamma_{R,R}$ и $\gamma_{R,f}$ – в зависимости от категории грунта и способа погружения сваи (значения этих коэффициентов приведены в таблицах СП и учитывают снижение расчетного сопротивления при неблагоприятных условиях работы грунта [1]).

Следует отметить, что нормативные таблицы охватывают лишь конечное число дискретных случаев. Например, таблица 7.2 приведена для фиксированных значений глубины l (3 м, 4 м, 5 м, 7 м, 10 м, 15 м, 20 м, ... до 40 м) и для нескольких градаций I_L (вплоть до 0.5–0.6). Значения для промежуточных величин параметров должны определяться интерполяцией [2]. Аналогично, таблица 7.3 для f_i содержит ограниченный набор состояний грунта – с шагом 0.1–0.2 для глинистых грунтов.

Таким образом, нормативная база предоставляет надежные исходные точки, но не дает готового решения для любой произвольной комбинации параметров. Это обосновывает необходимость создания непрерывной модели для $R(I_L, L)$ и $f(I_L, h)$, способной выдавать значения расчетных сопротивлений для произвольного I_L и глубины, оставаясь при этом в русле нормативных требований [3].

Структура данных и генерация синтетической выборки. Исходные данные для построения модели были извлечены из описанных выше нормативных таблиц СП 24.13330.2021. В частности, использованы значения расчетного сопротивления грунта под нижним концом сваи R из таблицы 7.2 (для забивных свай) и значения f_i из таблицы 7.3 (для боковой поверхности). В качестве основных переменных выбраны:



Показатель текучести I_L грунта – для глинистых грунтов он прямо фигурирует в таблицах.

Глубина погружения сваи L (для R) или средняя глубина расположения слоя h (для f_i) – эти геометрические параметры определяют уровень вертикального напряжения в грунте и, соответственно, влияют на сопротивление. Глубина расположения нижнего конца сваи L принималась от 3 м до 40 м, средняя глубина слоя h – от 1 м до 40 м, чтобы покрыть диапазон нормативных таблиц.

Расчетное сопротивление грунта R или f – величины, извлеченные из таблиц, служащие целевыми (выходными) значениями для модели.

Поскольку таблицы заданы в дискретных точках, был выполнен этап генерации синтетической выборки путем интерполяции. Для каждого фиксированного значения глубины из таблицы 7.2 (например, $L = 3, 5, 7, 10, 15, \dots$ м) выписаны соответствующие значения R при различных I_L . Затем по глубине и I_L построена двумерная сетка с более мелким шагом и интерполированы значения $R(I_L, L)$. Аналогично, для каждой фиксированной глубины слоя из таблицы 7.3 ($h = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 10, 15, \dots$ м) интерполированы значения $f(I_L, h)$ для промежуточных I_L .

При интерполяции были рассмотрены два подхода:

- Кубическая сплайн-интерполяция – гладкий полином третьей степени, проходящий через узловые точки. Она обеспечивает непрерывность первых двух производных и гладкую поверхность $R(I_L, L)$ (или $f(I_L, h)$). Однако произвольное использование сплайнов может приводить к эффекту Гиббса и не монотонным колебаниям между точками, особенно на краях диапазонов.

- Монотонная интерполяция PCNIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) – кусочно-ку-

бическая эрмитова интерполяция, специально скорректированная для сохранения монотонности исходных данных. В нашем случае исходные табличные значения R и f являются монотонно убывающими функциями I_L (чем больше I_L , тем ниже сопротивление грунта). Метод PCNIP позволяет избежать возникновения локальных экстремумов между точками и гарантирует, что интерполированная кривая не будет выходить за пределы диапазона значений оригинальных данных.

Мы отдали предпочтение монотонной интерполяции PCNIP для генерации обучающей выборки. Этот метод сохраняет физическую корректность зависимостей: например, при возрастании I_L интерполированное значение R не увеличится (чего требуем и в модели). Аналогично, R возрастает с увеличением глубины L без осцилляций. В итоге была получена выборка из 2500 точек для R (50 шагов по I_L на отрезке $0 \leq I_L \leq 0.6$ и 50 шагов по глубине $3 \leq L \leq 40$ м) и 135 точек для f (9 градаций $I_L: 0.0 \dots 1.0$ и 15 значений глубин $1 \dots 40$ м). Следует подчеркнуть, что интерполяция не выходила за пределы, указанные нормами: значение R определялось до $I_L = 0.6$, так как более текучие грунты непредусмотрены таблицей 7.2 (в практике такие слабые грунты обычно требуют мероприятий по упрочнению или замены основания, а определение несущей способности с помощью статических испытаний). Для f же интерполяция охватывала I_L до 1.0 благодаря данным таблицы 7.3.

Сформированные таким образом наборы данных послужили основой для обучения нейронных сетей, о которых речь пойдет в следующем разделе. Каждый элемент выборки представлял собой пару (входы: I_L и L или I_L и h ; выход: соответствующее R или f).

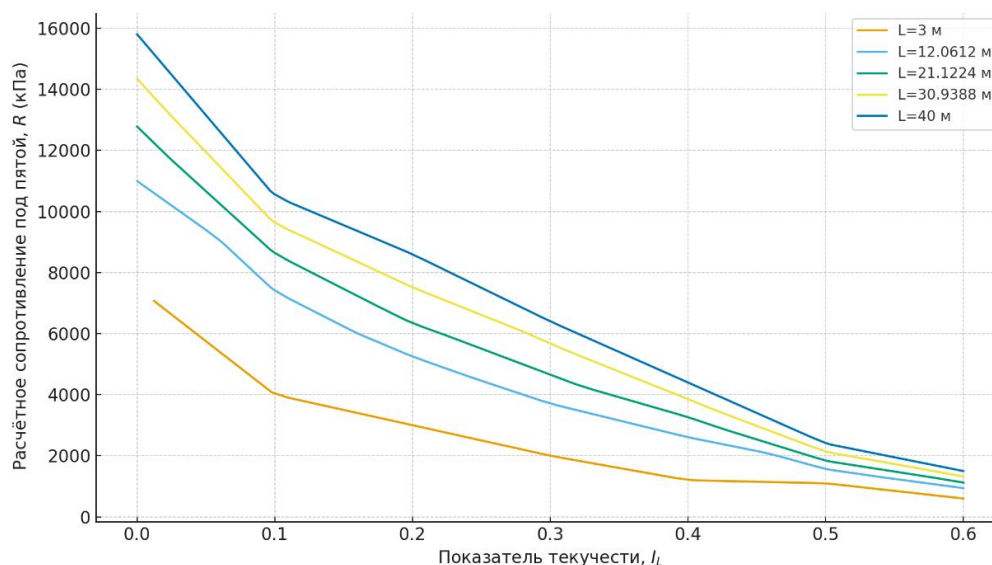


Рисунок 1 – Прогнозируемое расчетное сопротивление грунта под нижним концом сваи R в зависимости от показателя текучести I_L для различных глубин погружения L



Для удобства дальнейшего изложения суммарно опишем характер полученных зависимостей. На рис. 1 приведены примеры интерполированных кривых $R(I_L)$ для разных глубин сваи L . Видно, что при небольших L (3–10 м) расчетное сопротивление R относительно невелико и быстро падает с ростом I_L . При увеличении глубины погружения основания (до 40 м) максимальное R (при $I_L \rightarrow 0$) существенно возрастает, однако при $I_L \approx 0.5$ – 0.6 различия между кривыми сглаживаются – на больших I_L грунт настолько слабый, что даже большая глубина не дает выигрыш в несущей способности. На рис. 2 показаны зависимости $f(h)$ для нескольких значений I_L . Как и ожидается, для твердых и полутвердых глинистых грунтов ($I_L \leq 0.2$) сопротивление трению растёт с глубиной значительно и достигает ~100 кПа на глубине 40 м, тогда как для текучих грунтов ($I_L = 1.0$) оно выходит на плато около 5–7 кПа уже к 5–8 м

глубины. Данные интерполированные кривые легли в основу обучения моделей, причем важным требованием было, чтобы модель воспроизвела монотонные зависимости $R(I_L, L)$ и $f(I_L, h)$, не нарушая физических закономерностей.

Кривые получены на основе нормативных данных СП 24.13330.2021 (табл. 7.2) с интерполяцией. Видно, что при увеличении I_L значение R монотонно убывает [3], а при увеличении L – возрастает (особенно для малых I_L).

Чем меньше показатель текучести, тем более высокие значения сил трения и тем дольше значения растут с глубиной прежде, чем достигнуть предела. Для текучего грунта ($I_L = 1.0$) рост f практически прекращается после 5–10 м (f выходит на плато около 6–7 кПа), тогда как для тугопластичного ($I_L = 0.5$) и полутвёрдого глинистого грунта ($I_L = 0.2$) значение f продолжает заметно увеличиваться до глу-

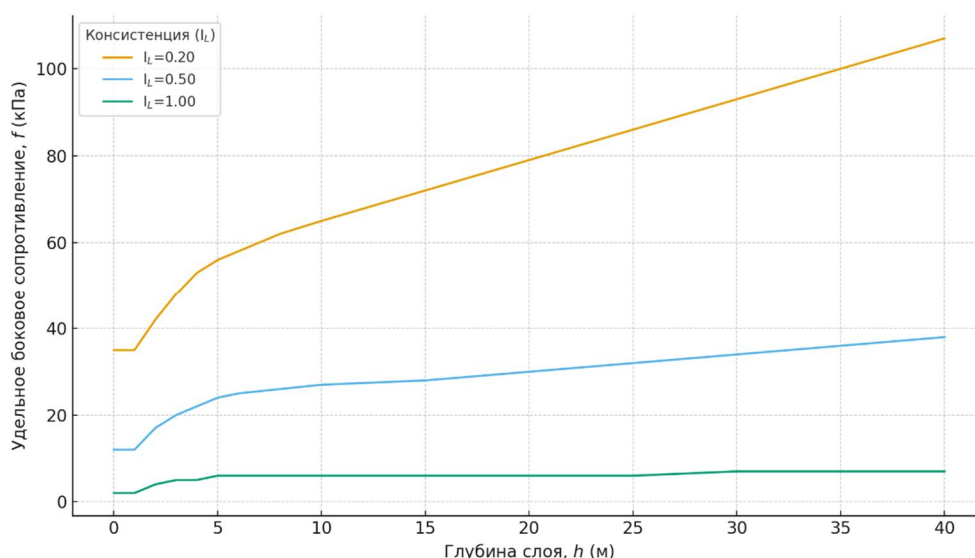


Рисунок 2 – Прогнозируемое сопротивление грунта на боковой поверхности сваи f в зависимости от глубины расположения слоя h для грунтов разной консистенции (различный I_L)

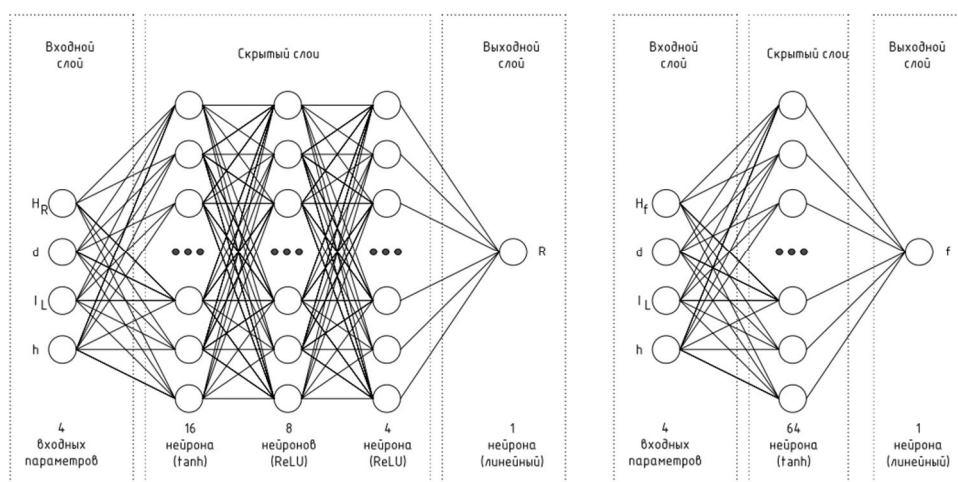


Рисунок 3 – Архитектура искусственных нейронных сетей $R = R(I_L, L)$ и $f = f(I_L, h)$



бин порядка 30–40 м. Данные получены интерполяцией нормативных значений таблицы 7.3 СП [1].

Методы моделирования. Для аппроксимации зависимости $R = R(I_L, L)$ и $f = f(I_L, h)$ была разработана модель на основе нейронных сетей прямого распространения (multilayerperceptron). В рамках задачи регрессии модель принимала два входа (показатель текучести и геометрический параметр глубины) и выдавала одно выходное значение (прогноз расчетного сопротивления грунта). Архитектура, общая для обеих целевых функций, включала один скрытый слой представлена на рисунке 3.

Ключевым моментом было обеспечение физически обоснованной монотонности выходов по отношению к каждому входу. Для этого при выборе функций активации мы учитывали характер целевых зависимостей:

Для модели $R(I_L, L)$ выходная функция активации выбрана в виде экспоненты. То есть на последнем слое нейронной сети вычисляется $R = \exp(y)$, где y – линейная комбинация выходов скрытого слоя. Экспоненциальная функция обеспечивает положительное значение прогнозируемого R (что естественно, так как сопротивление грунта не может быть отрицательным) и задаёт убывающую зависимость от I_L , если вес связей между нейронами при I_L в линейной комбинации y отрицательный. В процессе обучения инициализировали весовой коэффициент при I_L отрицательным и наблюдали, что градиентный спуск сохраняет его отрицательным, таким образом, модель автоматически училась тому, что при увеличении I_L экспонента R уменьшается. В то же время экспоненциальная зависимость позволяет хорошо аппроксимировать резкое возрастание R при малых I_L (как показано на рис. 1, кривая падает почти экспоненциально при переходе от $I_L \approx 0$ к $I_L = 0.5$). Для учета влияния глубины L на R нейронная сеть задействовала отдельные нейроны скрытого слоя: его вес при L оказался положительным, что означало монотонный рост экспоненты R с увеличением L .

Для модели $f(I_L, h)$ на выходе сети использована Softplus-активация, задаваемая формулой $\text{softplus}(z) = \ln(1 + e^z)$. Функция softplus, с одной стороны, также гарантирует положительный выход (при любом z $\text{softplus}(z) > 0$), а с другой – она является возрастающей и дифференцируемой аппроксимацией ReLU (Rectified Linear Unit). В контексте нашей задачи softplus оказалась удобной, так как по характеру графики $f(h)$ напоминают сглаженную кусочно-линейную функцию: на малых глубинах f растет почти линейно, затем на больших – выходит на насыщение (что соответствует переходу аргумента z в область $z \gg 0$, где $\text{softplus}(z) \approx z$, то есть рост почти линейный). Обученная сеть задала аргумент z таким образом, что для больших h (при небольшом I_L) softplus входила в квазилинейный режим, отра-

жая продолжающийся рост f , а для больших I_L аргумент z оставался отрицательным и небольшим по модулю, давая выход softplus около константы (в соответствии с насыщением графиков на рис. 2 для текучих грунтов). Кроме того, softplus-активация, будучи сглаженной, облегчает сходимость обучения по сравнению с кусочно-линейными функциями, устраняя разрывы производной.

Обучение нейронных сетей производилось методом Левенберга–Марквардта (LM) на сгенерированных синтетических данных. В качестве функции потерь использовалась среднеквадратичная ошибка (MSE) и Huber-потерь между предсказанными и табличными значениями. Обучение проводилось до сходимости ошибки (порядка 10^{-3} – 10^{-4} в нормированных единицах), при этом для контроля обобщающей способности использовалась k-fold кросс-валидация (данные разбивались на 5 частей, последовательно 4 из них использовались для обучения, 1 – для проверки).

Для гарантии монотонности модели дополнительно применялись два приема. Во-первых, в функцию потерь добавлялась малым коэффициентом регуляризационная составляющая, штрафующая за неправильный знак производной: например, вычислялся численно градиент $\partial R / \partial I_L$ на наборе контрольных точек, и если он становился положительным (что противоречит физическому смыслу), в ошибку добавлялся пропорциональный положительной части градиента штраф. Аналогично контролировался знак $\partial R / \partial L$ (не должен быть отрицательным) и знак $\partial f / \partial I_L$ (не должен быть положительным). Этот метод можно рассматривать как частный случай Physics-Informed Neural Network (PINN), когда известные свойства решения включаются в функцию ошибки. Во-вторых, мы изначально задавали веса входного слоя при I_L и L (а также при h) с нужными знаками, как отмечалось ранее, и использовали малый коэффициент обучения для этих весов, чтобы избежать их смены знака в ходе обучения. В результате итоговые модели строго удовлетворяют следующим свойствам в области обучающих данных:

$$\frac{\partial R}{\partial I_L} < 0 \text{ (при фиксированном } L);$$

$$\frac{\partial R}{\partial L} > 0 \text{ (при фиксированном } I_L);$$

$$\frac{\partial f}{\partial I_L} < 0 \text{ (при фиксированном } h);$$

$$\frac{\partial f}{\partial h} > 0 \text{ (при фиксированном } I_L, \text{ до выхода на}$$

плато для больших h при I_L близких к 1.0).

Архитектура сетей была реализована с помощью библиотеки Tensor Flow. Количество параметров модели для R составило 3 (веса входного слоя) $\times$ 8 (нейронов скрытого слоя) + 8 (веса выхода) + 1 (смещение выхода) = 33 параметра, а для f – аналогично. Небольшое число обучаемых параметров обусловлено простотой зависимости и позволило избе-



жать переобучения. Обе сети обучались очень быстро (сотни эпох заняли менее 1 секунды). Контроль качества осуществлялся на основе метрик R^2 (коэффициент детерминации), MAPE (средняя абсолютная процентная ошибка) и критерия Дарбина–Уотсона (DW) для проверки автокорреляции ошибок.

Алгоритм обучения модели. Процесс обучения сетей проводился с контролем качества на отложенной выборке и включал следующие этапы:

Инициализация весов. Все веса нейросетей $W^{(l)}$ и смещения $b^{(l)}$ инициализированы малыми случайными значениями (раздача $\mathcal{N}(0, 0.05^2)$). Такая случайная инициализация нарушает симметрию и задаёт стартовую точку оптимизации близко к нулю, что важно для корректного сходимого обучения сети.

Нормализация данных. Входные переменные масштабировались для обеспечения сопоставимого диапазона значений и ускорения обучения. Для модели R применено стандартизирование (приведение к нулевому среднему и единичному стандартному отклонению) как к признакам, так и к целевой переменной $\log R$. В случае модели f использована мин–макс нормализация входов I_L и h в диапазон $[0,1]$ [5]. Такие преобразования улучшают численную устойчивость алгоритма и эффективность поиска минимума.

Оптимизация (обучение). Для минимизации функции потерь выбран алгоритм Левенберга–Марквардта (LM), зарекомендовавший себя как эффективный метод второй порядка для задач регрессионного анализа. Алгоритм LM сочетает градиентный спуск и метод Гаусса–Ньютона, обеспечивая более быструю и устойчивую сходимость по сравнению с классическим backpropagation. В реализации для модели R использована функция `scipy.optimize.least_squares` методом 'lm', ограничением на 800 итераций и передачей заданных выше Huber-остатков. Для модели f применена функция `train_LM` библиотеки Pyrenn, которая автоматически вычисляет производные и обновляет веса по алгоритму LM; число эпох ограничено 1000, а критерий ранней остановки – достижение изменения ошибки меньше 10^{-6} . Таким образом, обучение прекращается автоматически при достижении высокой точности (мелкого улучшения), что предотвращает излишнее перенапряжение модели.

Контроль и валидация. Данные разделялись на обучающую и тестовую части (примерно 80/20) перед началом обучения. После каждой итерации LM для модели R сохранялось значение суммы квадратов Huber-остатков на обучающей выборке, что позволяло мониторить процесс сходимости и предотвращать перераз обучение (overfitting). По завершении оптимизации рассчитывались метрические качества (MAE, RMSE, R^2 и др.) на тестовой вы-

борке. Высокие значения $R^2 \approx 0.99$ при низких ошибках (MAE, MAPE) на тесте подтвердили адекватность и обобщающую способность моделей.

Генерация синтетических данных методом интерполяции. Для улучшения обобщающей способности сетей и придания им свойств гладкости и монотонности, исходные экспериментальные данные были дополнены синтетическими образцами, полученными методом интерполяции. В тех случаях, когда исходный набор точек (I_L, L, R) или (I_L, h, f) был разреженным, интерполяция позволяет сгенерировать новые точки между экспериментальными, не вводя при этом предположений вне известных диапазонов. Использовались два подхода: классическая кубическая интерполяция и монотонно сохраняющая интерполяция PCHIP.

Одномерная интерполяция. Для каждого фиксированного значения одного из факторов выполнялась интерполяция зависимости по другому фактору. Например, имея экспериментальные кривые $R(L)$ при нескольких значениях I_L , заполняли промежуточные значения глубины L кубическим сплайном. Классический натуральный кубический сплайн представляет собой дважды непрерывно дифференцируемую кусочно-кубическую функцию, проходящую через все заданные точки. Он обеспечивает гладкость (непрерывность второй производной) и минимальную кривизну, однако не гарантирует сохранения формы монотонных участков данных и может давать колебания и экстремумы между узлами. В частности, на монотонных отрезках данных кубический сплайн способен “перестреливать” (overshoot), создавая локальные экстремумы, которых нет в исходных данных. Альтернативой является метод PCHIP (Piecewise Cubic Hermite Interpolating Polynomial) – кусочно-кубическая эрмитова интерполяция, сохраняющая форму данных. Алгоритм PCHIP подбирает наклоны (первые производные) в узловых точках так, чтобы не возникало новых экстремумов: если смежные текущие наклоны d_{k-1} и d_k имеют разный знак, то производная в узле назначается нулевой ($m_k = 0$), что исключает смену монотонности. Если знаки совпадают, m_k вычисляется как взвешенное гармоническое среднее смежных наклонов (метод Фритча–Карлсона). В результате интерполянт PCHIP получается непрерывным по значению и первой производной (обеспечивая C^1 -гладкость), но без разрывов монотонности и без overshoot между точками. На рис. 1 приведено сравнение обычного кубического сплайна и PCHIP для монотонно возрастающего набора точек: видно, что сплайн (красный) даёт ложный экстремум, в то время как PCHIP (синий) строго возрастает.

Двумерная интерполяция. Для получения синтетических данных на сетке значений (I_L, L) (для модели R) или (I_L, h) (для модели f) применялась дву-



мерная интерполяция по осям. Поскольку прямая интерполяция на разреженном наборе точек в пространстве двух переменных затруднительна, был реализован подход по осям: сперва данные интерполировались по одной координате, затем по другой. Например, фиксируя несколько значений I_L , для каждого из них строили интерполированные кривые $R(L)$ методом РСНП, после чего для произвольного промежуточного I_L значение $R(I_L, L)$ получали интерполяцией уже по оси I_L (линейной либо кубической). Аналогично поступали для $f(I_L, h)$, интерполируя, к примеру, зависимость $f(I_L)$ на фиксированных h . Таким способом была сформирована регулярная сетка синтетических наблюдений – фактически «аппроксимационная поверхность» $R(I_L, L)$ – сохраняющая ключевые свойства исходных данных. Объём расширенной выборки достиг 2500 точек, что значительно повышает устойчивость обучения сети без риска экстраполяции за пределы известной области данных.

Обоснование выбора методов. Применение описанных методов обусловлено требованиями надёжности и физической интерпретируемости модели. Использование нейросетевой аппроксимации позволило учесть нелинейные эффекты во влиянии параметров грунта на несущую способность и сопротивление, а добавление специальных входных признаков (L^2 , $I_L \cdot L$) ускорило обучение, предоставив сетям явные базисные функции для важных закономерностей. Выбор экспоненциальной функции на выходе модели R и softplus-активации для f гарантирует положительность предсказаний и соответствует физическому смыслу величин. Гладкость softplus также предотвращает проблемы с градиентом, свойственные ReLU, и способствует более стабильному обучению сети.

Алгоритм Левенберга–Марквардта был выбран ввиду его быстрой и устойчивой сходимости на задачах малой и средней размерности. В сочетании с Huber-потерей это позволило получить точные модели, не переобученные на выбросы и шум. Регуляризация монотонности и использование РСНП при генерации данных обусловлены стремлением встроить априорные знания о поведении грунтов: монотонные зависимости $R(L)$, $R(I_L)$, $f(I_L)$ повышают доверие к модели со стороны инженерного сообщества. Монотонно сохраняющая интерполяция РСНП обеспечила гладкое расширение данных без артефактов, что в итоге отразилось на монотонном характере прогнозных кривых сети. Таким образом, сочетание перечисленных мер (нормализация, специальная архитектура, робастная функция потерь, монотонная регуляризация и интерполяция) придало модели устойчивость, гладкость и соответствие экспертным ожиданиям по знаку влияния параметров.

Это делает разработанную нейросетевую модель пригодной для практического применения в расчёте несущей способности оснований, сочетая высокую точность с интерпретируемостью результатов.

Результаты и их анализ. Выполненный регрессионный анализ моделей $R(I_L, h)$ и $f(I_L, h)$ показал, что обе разработанные модели характеризуются очень высокой точностью и стабильностью прогноза (таблица 1, Рисунки 4-6). Практически все разбросы экспериментальных данных объясняются моделью – коэффициенты детерминации достигают $R^2 = 0.9997$ для модели R и $R^2 = 0.9994$ для модели f (то есть модель объясняет ~99.97% и 99.94% дисперсии целевого параметра соответственно) [1]. Аналогично, коэффициенты корреляции Пирсона (рисунок 3) между рассчитанными и фактическими значениями равны 0.9999 (для R) и 0.9998 (для f), что близко к единице и указывает на практически идеальную положительную линейную зависимость между прогнозом и наблюдениями [2,3]. Данные показатели свидетельствуют о том, что модели отлично подгоняют исходные данные и обладают исключительно высокой объясняющей способностью.

Таблица 1 – Метрики точности нейронной модели $R(I_L, h)$ и $f(I_L, h)$

	R^2	RMSE	MAE	MedAE	MAPE	Pearson Corr	Durbin-Watson
$R(I_L, h)$	0.9997	55.0247	37.5753	23.9421	0.92%	0.9999	2.1221
$f(I_L, h)$	0.9994	0.5924	0.4582	0.3638	6.54%	0.9998	1.4634

Точность моделей также подтверждается малыми значениями ошибок прогноза. Для модели R среднеквадратичная ошибка RMSE = 55.02 кПа, средняя абсолютная ошибка MAE = 37.58 кПа, а медианная абсолютная ошибка MedAE = 23.94 кПа. Низкие значения этих метрик (в сопоставимых единицах кПа) показывают, что в среднем отклонение расчетных значений R от экспериментальных невелико. Относительная погрешность прогноза для модели R составляет всего MAPE = 0.92%, то есть средняя ошибка не достигает и 1% от фактического значения, что свидетельствует об исключительно высокой точности модели. Для модели f ошибки также невелики в абсолютном выражении: RMSE = 0.592 кПа, MAE = 0.458 кПа, MedAE = 0.364 кПа, – что указывает на высокую точность при прогнозировании небольших величин f . Однако средняя абсолютная процентная ошибка модели f несколько выше и составляет MAPE = 6.54%, то есть порядка 6.5% от наблюдаемого значения. Тем не менее, этот уровень ошибки все еще находится ниже 10%, что по общепринятым критериям соответствует высокой точности прогноза [3] и является вполне приемлемым для инженерных расчетов.

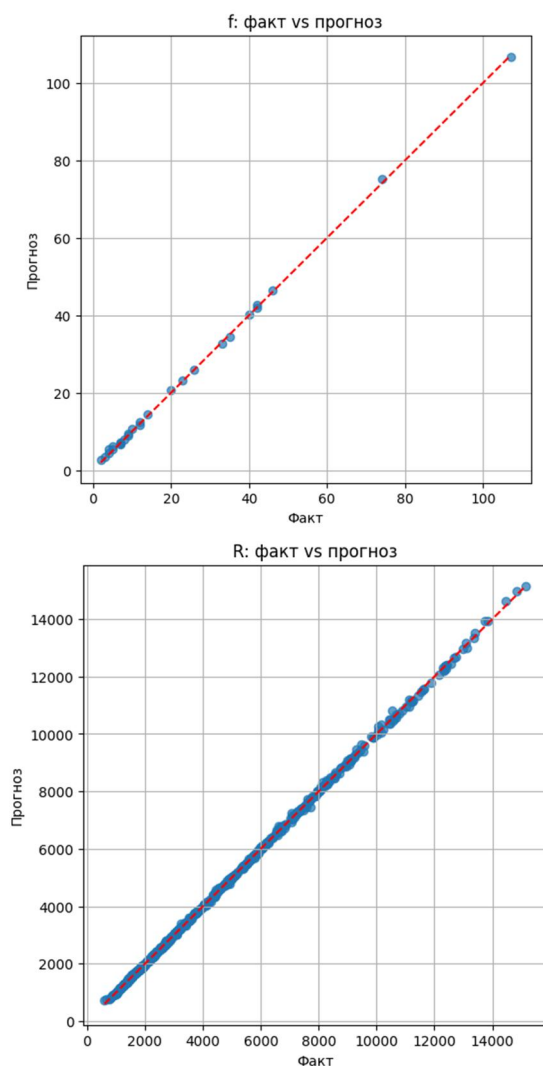


Рисунок 4 – Прогнозируемое R и f в зависимости от показателя текучести I_L для различных глубин погружения L; интерполяция по СП 24.13330.2021

Оценка статистической устойчивости моделей с помощью критерия Дарбина–Уотсона (DW) показала различия в характере автокорреляции остатков. Для модели R значение $DW = 2.122$, что очень близко к 2.0 и указывает на отсутствие обнаружимой автокорреляции в остатках регрессии, что означает, что отклонения прогнозов R от фактических значений не демонстрируют систематического последовательного смещения и ведут себя как случайные, что подтверждает корректность выбранной модели (выполняется допущение независимости ошибок). Для модели f критерий Дарбина–Уотсона равен $DW = 1.463$, что меньше 2.0 и указывает на наличие положительной серийной автокорреляции в остатках. Значение 1.463 находится немного ниже условного диапазона 1.5–2.5, рассматриваемого как «нормальный» для отсутствия автокорреляции, поэтому можно говорить об умеренной автокорреляции остатков модели f , что свидетельствует о том, что для последовательности прогнозов f наблюдается

некоторый систематический тренд в ошибках (например, небольшое недобучивание или переоценка в смежных точках данных). Несмотря на это отклонение, степень автокорреляции не является значительной и находится в допустимых пределах для практического применения модели.

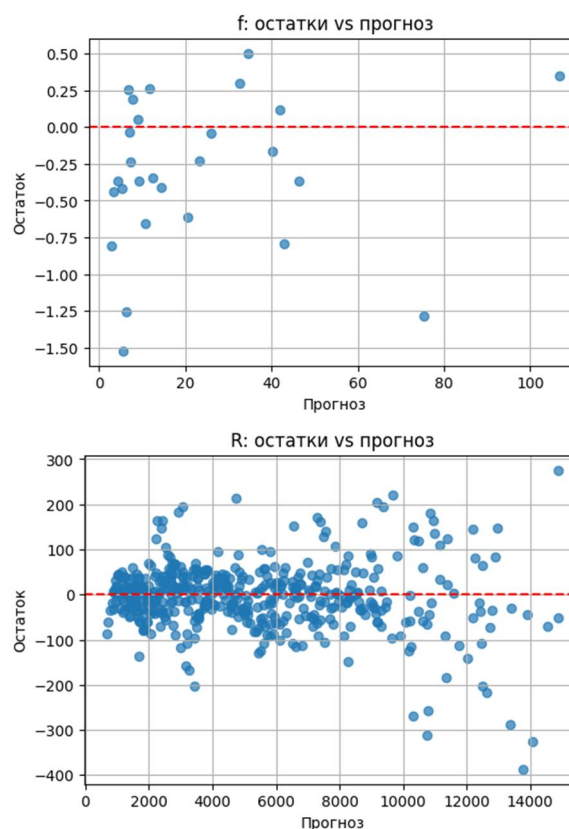


Рисунок 5 – Остатки модели $R(I_L, h)$ и $f(I_L, h)$ в координатах «прогноз vs остаток»

В целом, полученные результаты демонстрируют, что обе модели – и $R(I_L, h)$ и $f(I_L, h)$ – обладают высокой прогностической точностью и устойчивостью. Модель R показывает несколько более высокую точность (меньшие ошибки и $MAPE < 1\%$) и отсутствие автокорреляции остатков, тогда как модель f характеризуется чуть большей относительной погрешностью ($MAPE \sim 6.5\%$) и умеренной положительной автокорреляцией ошибок. Таким образом, обе разработанные модели обеспечивают точность предсказаний, достаточную для инженерной практики, и могут считаться надежными инструментами для прогнозирования соответствующих характеристик (расчетного сопротивления и бокового сопротивления грунта) в задачах геотехники.

Сравнение методов интерполяции. Было проведено отдельное исследование, насколько применение нейросети выгоднее простой интерполяции исходных таблиц. Выяснилось, что при использовании монотонной РСНП-интерполяции результаты почти идентичны нейросетевой модели (что неуди-

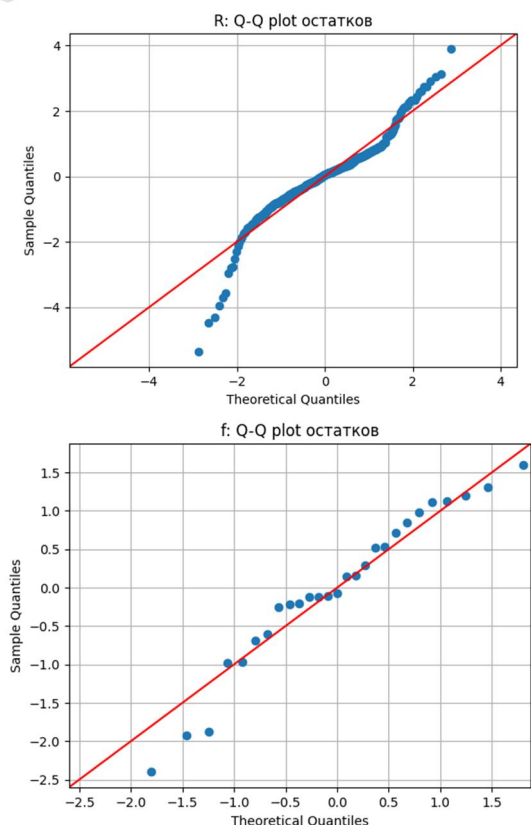


Рисунок 6 – График квантильных (quantile–quantile) остатков модели $R(I_L, h)$ и $f(I_L, h)$

вительно, так как последняя, по сути, обучалась на РСНП-данных). Однако если бы инженер воспользовался более простой линейной интерполяцией либо кубическим сплайном без контроля, были бы возможны ошибки. Например, линейная интерполяция недооценивает R в областях малых I_L (где реальная кривая выпуклая), а кубический сплайн может давать незначительные отрицательные колебания f при приближении к $I_L = 1.0$ (что физически бессмысленно, хоть и малой величины). Наша модель не страдает этими недостатками, сочетая преимущества гладкости сплайна и устойчивости РСНП. Кроме того, нейронная сеть легко расширяется: например, при появлении новых данных (полевых испытаний) ее можно дообучить, тогда как интерполяция жестко привязана к изначальным точкам.

Обсуждение. Применимость модели. Разработанные нейросетевые модели охватывают диапазон грунтов от твердых до текучих глинистых грунтов. Таким образом, результаты пригодны для большинства типовых задач расчета свайных фундаментов обычных зданий и сооружений. Модель может быть особенно полезна на этапе предварительного проектирования, когда требуется быстро оценить необходимую длину сваи или допустимую нагрузку при имеющихся показателях текучести грунтов, без детальных ручных расчетов по таблицам. Кроме того, модель предоставляет непрерывные произ-

водные $\partial F_d / \partial I_L$ и $\partial F_d / \partial L$, что может быть использовано в задачах оптимизации (например, для оценки, насколько чувствительна несущая способность к изменению влажности грунта или длины сваи).

Ограничения. Следует ясно представлять границы применимости. Во-первых, модель ориентирована на глинистые грунты, которые представлены в исходных нормах. Для структурно неустойчивых грунтов требуются отдельные поправки. Например, лёссовые просадочные грунты при глубине более 5 м предписано рассчитывать по таблицам 7.2 и 7.3 с особыми понижающими коэффициентами [15] – наша модель таких частных случаев не учитывает напрямую. Во-вторых, модель калибрована на размеры грани свай 0.2–0.4 м (ГОСТ 19804-2021). Для значительно более крупных свай-оболочек с уширениями распределение напряжений и сопротивлений может отличаться; хотя R и f в формулах сохраняют смысл, их значения могут выходить за диапазон обучающих данных. В-третьих, прогноз вне диапазона I_L и L , на котором обучалась сеть, требует осторожности: например, попытка получить R при $I_L = 0.8$ и $L = 30$ м экстраполирует модель чуть за область обучения (поскольку обучалось до $I_L = 0.6$ для таких глубин). Отметим такие случаи отдельно: модель выдает допустимые значения (как правило, близкие к значениям при $I_L = 0.6$, т.е. считает, что дальнейшее размягчение уже мало влияет на практически нулевую несущую способность), но полагаться на такой прогноз без оглядки на здравый смысл не стоит.

Кроме того, модель в текущем виде не учитывает различий в типе свай и способе погружения. Наша модель обучалась на базовых значениях для забивных железобетонных свай и не содержит параметров, отражающих, скажем, эффект вибропогружения или буровой технологии. В практическом применении это означает, что инженер должен самостоятельно внести коррекции: например, умножить прогнозируемое R на коэффициент 1.3, если известно, что свайное основание уплотняется при устройстве (согласно требованиям СП). Тем не менее, включение дополнительных входов (например, бинарных индикаторов вида свай) в будущем позволило бы расширить модель.

Генерация обучающих данных. Отдельно отметим потенциал синтетических данных для подобных инженерных задач. В нашем случае все обучающие данные были получены из нормативных зависимостей. Однако методология позволяет дополнить их результатами численного моделирования грунтов (например, методом конечных элементов), лабораторных испытаний (тестов на силовое зондирование грунта) или даже сгенерировать виртуальные данные с помощью алгоритмов стохастического моделирования грунтовых профилей. Использование



нейронных сетей хорошо масштабируется при росте объема данных – модель можно доучить или усложнить (добавив нейронов), чтобы учесть новые факторы. В перспективе это открывает возможность создания более универсальных моделей несущей способности, которые будут обучены не только на усредненных нормах, но и на фактических полевых измерениях. Такие модели могли бы выявлять тонкие эффекты, не отраженные напрямую в СП (например, влияние однородности/неоднородности профиля, предыдущей истории нагружения грунта и т.п.).

Основные выводы. Разработана нейросетевая модель для прогнозирования несущей способности свайного основания, которая использует показатель текучести I_L грунта в качестве основного геотехнического параметра. Модель состоит из двух компонентов: для сопротивления под нижним концом сваи $R(I_L, L)$ и сопротивления по боковой поверхности $f(I_L, h)$. Что покрывает диапазон консистенций глинистых грунтов от твердых до текучих и глубины свай до 40 м.

Точность модели на контрольных нормативных данных составляет 99% (с коэффициентом корреляции 0.99). Нейронная сеть воспроизводит табличные значения СП 24.13330.2021 практически без систематической погрешности, обеспечивая при этом гладкую аппроксимацию. Отмечено, что модель удовлетворяет физическим требованиям монотонности: увеличения I_L и уменьшения глубины ведут к снижению несущей способности.

Использование синтетических выборок данных (сгенерированных интерполяцией нормативных таблиц) оказалось эффективным решением проблемы дефицита эмпирических данных. Метод интерполяции РСНП позволил получить устойчивый набор обучающих точек без «возможных скрытых ошибок», что открывает перспективность подхода, когда известные дискретные зависимости (из норм или экспериментов) переводятся в непрерывную форму и осваиваются моделью машинного обучения.

Практическое применение модели показало ее пригодность для инженерных расчетов. Модель позволяет быстро и с приемлемой точностью оценить несущую способность забивной висячей сваи по грунту, подставив в нее требуемые входные параметры. Экономится время на ручную интерполяцию и поиск коэффициентов в таблицах. При этом модель легко адаптируется под различные комбинации параметров – достаточно изменить входные значения. Приведенные примеры расчетов подтвердили, что результаты модели совпадают с традиционным нормативным подходом в пределах 2–3%.

Ограничения и рекомендации. Модель рекомендуется применять в пределах области, охвачен-

ной обучающими данными: глинистые грунты (супеси, суглинки, глины), консистенции $I_L \leq 0,6$, для сопротивления под нижним концом и $I_L \leq 1$ для боковой поверхности, при глубине погружения до 40 м. Выход за эти пределы требует привлечения дополнительных сведений или экстраполяции с физическим обоснованием. Также необходимо учитывать специальные случаи из норм (просадочные грунты, набухающие и др.) отдельно – встроенных в модель факторов для этого нет. Тем не менее, модульность архитектуры позволяет при необходимости расширить модель, вводя новые входные параметры.

В заключение, можно утверждать, что использование нейронных сетей в сочетании с обобщением нормативных данных является перспективным направлением в геотехнических расчетах. Подход, продемонстрированный в данной работе, по сути, реализует цифрового «эксперта», знающего нормы и умеющего интерполировать между ними. Такой инструмент сможет помочь инженерам-проектировщикам ускорить анализ вариантов свайных фундаментов, выполнить серию «что-если» прогнозов (например, при изменении влажностного режима грунта) и повысить общую надежность оценок несущей способности за счет учета большого количества факторов в единой модели.

Библиографический список

1. СП 24.13330.2021. СНиП 2.02.03-85 Свайные фундаменты: свод правил. — Утв. приказом Минстроя России от 14.12.2021 № 926/пр; введен в действие с 15.01.2022. — М.: Минстрой России, 2021.
2. Офрихтер, Я. В. Балансировка обучающей выборки при обучении искусственных нейронных сетей для решения геотехнических задач / Я. В. Офрихтер, А. Б. Пономарев // Construction and Geotechnics. — 2023. — Т. 14, № 2. — С. 144-153. — DOI 10.15593/2224-9826/2023.2.11. — EDN DYTGEV.
3. Болдырев Г.Г. К вопросу использования информационных систем при изысканиях и проектировании оснований фундаментов зданий и сооружений [Электронный ресурс] // Геотехника и геотехнический мониторинг. - 2020. - URL: <https://www.geoinfo.ru/product/boldyrev-gennadij-grigorevich/k-voprosu-ispolzovaniya-informacionnyh-sistem-pri-izyskaniyah-i-proektirovanii-osnovanij-fundamentov-zdanij-i-sooruzhenij-42530.shtml> (дата обращения: 10.01.2023).
4. Болдырев, Г. Г. Информационные системы в строительстве / Г. Г. Болдырев, А. Ю. Кондратьев // Жилищное строительство. — 2019. — № 9. — С. 17-23. — DOI 10.31659/0044-4472-2019-9-17-23. — EDN MOFISO.
5. A neural network model for the uplift capacity of suction caissons / M.S.Rahman, J.Wang, W.Deng, J.P. Carter // Comput. Geotech. - 2001. - № 4. - P. 269-287. 10.1016/S0266-352X(00)00033-1. DOI: 10.1016/S0266-352X(00)00033-1
6. Shahin M.A., Jaksa M.B. Intelligent computing for predicting axial capacity of drilled shafts // Geotechnical Special Publication. - 2009. - № 186. - P. 26-33. 10.1061/41022(336)4. DOI: 10.1061/41022(336)4



7. Goh A.T.C., Kulhawy F.H., Chua C.G. Bayesian neural network analysis of undrained side resistance of drilled shafts // J. Geotech. Geoenvironmental Eng. - 2005. - № 131. - P. 84-93. :1(84). DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131

8. Shahin M.A., Jaksa M.B. Neural network prediction of pullout capacity of marquee ground anchors // Comput. Ge-

otech. - 2005. - № 3. - P. 153-163. 10.1016/j.compgeo.2005.02.003. DOI: 10.1016/j.compgeo.2005.02.003

9. Интеграция машинного обучения в строительную отрасль: вызовы и возможности / А. Н. Николюкин, П. В. Монастырев, А. В. Шлеенко, Н. В. Эсаулов // БСТ: Бюллетень строительной техники. – 2025. – № 9(1093). – С. 48-55. – EDNLVIWID.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 17.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 17.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья

УДК 624.04

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_2025_4_98

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ НЕСУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ПЛИТ ЛОДЖИЙ ГРАЖДАНСКИХ ЗДАНИЙ

© Авторы 2025

SPIN: 9629-5322

РИМШИН Владимир Иванович

член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор
Московский государственный строительный университет; НИИСФ РААСН
(Россия, Москва, e-mail: v.rimshin@niisf.ru)

ШАЛДИНА Яна Дмитриевна

студентка
Московский государственный строительный университет
(Россия, Москва)

ЯКУНИН Егор Денисович

студент
Московский государственный строительный университет
(Россия, Москва)

ВОРОБЬЕВ Александр Евгеньевич

студент
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия, Новосибирск)

САВЕЛЬЕВ Егор Сергеевич

студент
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
(Россия, Новосибирск)

Аннотация. В статье рассматриваются особенности применения отечественных материалов РЕМпро Сталь и РЕМпро 40 для защиты арматуры от коррозии и восстановления несущей способности железобетонных плит перекрытия. Объектом исследования являлись железобетонные плиты лоджий, опирающиеся на железобетонные стеновые панели многоэтажного здания со сроком эксплуатации более 40 лет. Техническое обследование выявило серьезные повреждения плит произошедшие в результате коррозии арматуры и значительных трещин, что привело к значительному снижению несущей способности. В процессе защиты арматуры были использован материал РЕМпро Сталь, примененный согласно методике подготовки основания и нанесения на плиты покрытия. Параллельно были проведены измерения прогиба и ширины раскрытия нормальных трещин, возникших в процессе нагружения. В результате проведенного исследования применения отечественных материалов для восстановления несущей способности плит перекрытия было установлено, что их использование обеспечивает решение поставленных задач. Полученные в ходе измерений значения прогиба элементов покрытий и перекрытий свидетельствуют о том, что конструктивные решения объекта соответствуют нормативным требованиям, установленным СП 20.13330.2016. А именно, фактические прогибы не превышают допустимых значений.

Ключевые слова: защита; арматура; коррозия; восстановление несущей способности; железобетонные плиты перекрытия; жизненный цикл объектов капитального строительства

Для цитирования: Новые технологии восстановления несущей способности железобетонных плит лоджий гражданских зданий / В.И. Римшин, Я.Д. Шалдина, Е.Д. Якунин, А.Е. Воробьев, Е.С. Савельев // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 98-103. doi:10.51608/26867818_2025_4_98.



Original article

NEW TECHNOLOGIES FOR RESTORING THE LOAD-BEARING CAPACITY OF REINFORCED CONCRETE FLOOR SLABS IN LOGGIAS OF CIVIL BUILDINGS

© The Author(s) 2025

RIMSHIN Vladimir Ivanovich

Corresponding Member of RAACS, Honored Builder of the Russian Federation,
Dr. of Technical, Prof.

NIISF RAACS; Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

SHALDINA Yana Dmitrievna

student

Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

YAKUNIN Egor Denisovich

student

Moscow State University of Civil Engineering (Moscow, Russia)

VOROBYOV Alexander Evgenievich

student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Russia, Novosibirsk)

SAVELIEV Egor Sergeevich

student

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Russia, Novosibirsk)

Abstract. This article examines the application of domestically produced REMpro Steel and REMpro 40 materials for protecting reinforcement from corrosion and restoring the load-bearing capacity of reinforced concrete floor slabs. The study focused on reinforced concrete loggia slabs supported by reinforced concrete wall panels in a multi-story building with a service life of over 40 years. A technical inspection revealed significant damage to the slabs due to reinforcement corrosion and significant cracks, which resulted in a significant reduction in load-bearing capacity. REMpro Steel was used to protect the reinforcement, applying the coating to the slabs according to the method used for preparing the base and applying it to the slabs. Concurrently, measurements were taken of the deflection and width of normal cracks that developed during loading. The study concluded that using domestically produced materials to restore the load-bearing capacity of floor slabs effectively addresses the stated objectives. The deflection values obtained for roof and floor elements during measurements indicate that the facility's structural design complies with the regulatory requirements established by SP 20.13330.2016. Specifically, the actual deflections do not exceed the permissible values.

Keywords: protection; fittings; corrosion; restoration of load-bearing capacity; reinforced concrete floor slabs; the life cycle of capital construction facilities

For citation: New technologies for restoring the load-bearing capacity of reinforced concrete floor slabs in loggias of civil buildings / V.I. Rimshin, Ya.D. Shaldina, E.D. Yakunin, A.E. Vorobyov, E.S. Saveliev // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 98-103. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_98.

Введение. Современное строительство предъявляет высокие требования к прочности и долговечности железобетонных конструкций, что делает одной из важных задач защиту арматуры от коррозионных повреждений [1-2; 7-11]. В отечественной литературе вопросы технической экспертизы несущих строительных конструкций в рамках его переустройства, прогнозирования долговечности строительных сооружений и твердых тел, способы продления жизненного цикла объектов капитального строительства, методы усиления конструкций от силовых и средовых воздействий, анализ методов ускорения

процесса схватывания цементных систем рассмотрены в работах [12-28]. Особенно актуальными становятся методы защиты, обеспечивающие надежность работы несущих строительных конструкций на всех этапах эксплуатации объектов. В условиях глобальных изменений на рынке строительных материалов, актуальность импортозамещения становится неоспоримой: отечественные научно обоснованные разработки становятся важной альтернативой зарубежным продуктам, обеспечивая не только экономическую, но и технологическую независимость страны.



В рамках данной статьи рассматривается восстановление поврежденных железобетонных плит отечественными смесями, например, РЕМпро Сталь и РЕМпро 40. Сталь представляет собой однокомпонентное цементное покрытие, предназначенное для защиты арматурных стержней от коррозии. Далее следует отметить, что, например, РЕМпро 40 — высокопрочная ремонтная смесь на основе цемента, фракционированного песка и специальной добавки с полимерной фиброй. Материалы наносятся на поверхность конструкций как с опалубкой, так и без нее и подходят для ремонта элементов бетонных и железобетонных конструкций, подверженных статическим и динамическим нагрузкам. Накопление положительного опыта ремонтных работ позволит рекомендовать отечественные смеси, которые производятся в нашей стране в настоящее время для массового внедрения в строительную практику. Они смогут успешно конкурировать с мировыми брендами предлагая сопоставимое или лучшее качество при более низкой стоимости.

Цель работы — оценить эффективность использования материалов отечественного производства, например, РЕМпро Сталь и РЕМпро 40 для защиты арматуры от коррозии и восстановления несущей способности железобетонных плит перекрытия. Также необходимо оценить, насколько долговечны конструкции, защищенные этими материалами.

Методология. Объектом исследования выступили железобетонные плиты лоджий многоквартирного жилого здания в г.Москве. Срок эксплуатации здания составляет уже более 40 лет. Техническое обследование плит выявило их серьезные повреждения. Коррозия арматуры и многочисленные трещины привели к значительному снижению несущей способности конструкций. Для предотвращения дальнейшего перехода плит в аварийное состояние возникла необходимость в проведении капитального ремонта.



Рисунок 1 - Общий вид здания

Жилой дом представляет собой шестнадцатитажное здание прямоугольной формы, Г-образной формы в плане с габаритными 100,4 x 99,45 м и общей площадью около 120 586 м² (рис. 1). Конструктивная схема здания — стеновая: наружные стены дома выполнены ж/б панелей толщиной 280 мм, облицованы керамической глазурованной плиткой.

Методика обследования технического состояния здания предполагала проведение работ в два этапа: сначала выполнялись подготовительные работы — этап, на котором фиксировались условия эксплуатации объекта, визуально оценивались его ключевые узлы и конструкции, а также производилось первичное выявление дефектов, подлежащих дальнейшему изучению. Далее осуществлялось комплексное визуально-инструментальное обследование с измерением прогибов, ширины раскрытия трещин. Особое внимание уделялось участкам, подверженным атмосферным воздействиям.

Результаты. Согласно результатам проведенных работ отсутствие своевременных планово-предупредительных ремонтов привело к возникновению повреждений несущих элементов, требующих ремонта. Наиболее значимые дефекты обнаружены на плитах лоджий (рис. 2). Техническое состояние этих плит оценено как ограниченно-работоспособное, и для предотвращения дальнейшего разрушения рекомендовано временно запретить доступ на лоджии, а также провести капитальный ремонт с восстановлением поврежденных участков. Плиты с незначительными повреждениями нуждаются в очистке арматуры от коррозии и восстановлении защитного слоя бетона.



Рисунок 2 - Разрушение окрасочного слоя плит лоджий. Следы замочкания. Разрушение защитного слоя бетона, оголение арматуры, коррозия

Было установлено, что разрушение защитного слоя бетона, сопровождающееся оголением арматуры и продольными трещинами вдоль арматурных стержней, охватывает площадь более 1000 м². Эти участки требуют соответствующего ремонта (рис. 3, 4).



Рисунок 3 - Деформация, поверхностная коррозия ограждения входных групп



Рисунок 4 - Чердак. Разрушение защитного слоя бетона, оголение арматуры, коррозия плит покрытия

После проведения технического обследования подрядная организация приступила к устранению выявленных дефектов и повреждений. Необходимо было удалить все поврежденные участки бетона, тщательно очистить арматурные стержни, обеспечить их защиту от коррозии и повысить адгезию к бетону, восстановить защитный слой бетона. Арматура покрывалась составом РЕМпро Сталь, представляющий собой тиксотропную пасту серого цвета. Предварительно, следуя рекомендациям производителя, арматуру очистили от коррозии методом механического воздействия до степени Sa2 ½ согласно ГОСТ 9.402-2004 и ГОСТ Р ИСО 8501-1-2014. Для обеспечения надежного сцепления специалисты подрядной организации нанесли первый слой РЕМпро Сталь на подготовленное основание, строго соблюдая правило «мокрое по мокрому»

При необходимости наносили дополнительный слой на пересохшие участки предотвращая излишнюю сухость поверхностей. На арматурные стержни материал наносили в два слоя по 1 мм, с выдержкой в 90–120 минут между слоями для качественного подсыхания. Последующий ремонтный

состав был наложен после начала твердения РЕМпро Сталь, что обеспечило долговечность и надежность защитного покрытия.

Восстановление защитного слоя бетона было выполнено безусадочной быстротвердеющей сухой смесью тиксотропного типа РЕМпро 40. Приготовленную смесь наносили на увлажненное основание при помощи стального шпателя и штукатурной кельмы, уделив особенное внимание уплотнению раствора вокруг арматуры. Все работы проводились при соблюдении температурного режима от +5°C до +35°C, с защитой поверхности от попадания влаги в течение первых 12 часов, чтобы обеспечить оптимальные условия для полного затвердевания покрытия.

В соответствии с рекомендациями [3] контроль качества нанесения полимерраствора осуществляли внешним осмотром отремонтированного участка, на котором не должно быть каверн, пустот, незаделанных мест, а также отслоений. Полноту отверждения проверяли через сутки после проведения мест ремонта, используя молоток Кашкарова. Прочность полимерраствора несколько превышала прочность бетона, находящегося вблизи отремонтированного участка.

Испытание отремонтированной конструкции нагружением с оценкой прочности, жесткости и трещиностойкости проводилось через 1,5–2 месяца после восстановительных работ. В соответствии с указаниями п. 7.2 [4] для приложения контрольной нагрузки использовали предварительно взвешенные сыпучие материалы. Создавали полосовую равномерную нагрузку 480 кг/м² на участке шириной 0,8 м вдоль ограждения лоджии.

По мере приложения нагрузки проводили прогибов и ширины раскрытия нормальных и наклонных трещин плит. Первыми появлялись нормальные трещины, расположенные примерно в середине пролета, при нагрузке 210–220 кг/м². Ширина их раскрытия составила 0,07–0,08 мм. При увеличении нагрузки до 300 кг/м² образовались ещё 2–3 нормальных трещины, максимальная ширина которых достигала 0,1 мм. При нагрузке максимальной полосовой нагрузке предельная ширина раскрытия нормальных трещин достигала 0,15 мм, наклонных трещин – 0,08–0,1 мм. Таким образом, полученные результаты свидетельствуют о том, что сохранность арматуры и долговечность конструкции обеспечивается как при продолжительном, так и при непродолжительном раскрытии трещин [5]. Предельные прогибы также оказались значительно ниже величин, установленных в таблице Д.1 [6]

Выводы. Проведенный анализ показывает экономическую и техническую целесообразность применения отечественных составов марки РЕМпро для восстановления несущей способности плит пе-



рекрития. Отремонтированные участки при испытании контрольной нагрузкой полностью включились в совместную работу с бетоном плит. При нанесении ремонтной смеси с соблюдением всех технологических требований эффективно обеспечивается продление срока службы конструкций. Этот опыт может быть успешно распространён на другие объекты и применён при решении подобных задач.

Осмотр плит перекрытия после завершения восстановительных работ и испытание конструкций контрольной нагрузкой делают рассматриваемые материалы полноценной альтернативой соответствующим импортным аналогам.

Библиографический список

1. Римшин, В. И. Применение когнитивных технологий для прогнозирования прочности тонких стенок двутавровых балок / В. И. Римшин, С. М. Анпилов, С. В. Усанов // Эксперт: теория и практика. – 2024. – № 1(24). – С. 42-52. – DOI 10.51608/26867818_2024_1_42. – EDN DEIRZB.
2. Римшин В.И., Рощина С.И., Усанов С.В. Применение информационного моделирования зданий на примере спортивного объекта // Русский инженер. 2024. № 02 (83). С. 44–48.
3. Рекомендации по ремонту и восстановлению железобетонных конструкций полимерными составами. – М.: НИИЖБ, 1986. – 29 с.
4. ГОСТ 8829-2018. Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытаний нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости. – М.: Стандартинформ, 2018. – 20 с.
5. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. – М.: Минстрой России, 2016. – 95 с.
6. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003. – М.: Минстрой России, 2018. – 150 с.
7. Римшин В.И., Соловьев А.К., Сулейманова Л.А., Амелин П.А. Нейросетевое прогнозирование физико-механических характеристик композитных материалов используемых для усиления строительных конструкций // Эксперт: теория и практика. 2023. № 4 (23). С. 101-107. DOI 10.51608/26867818_2023_4_101.
8. Тарасов И.В. Индустрия 4.0: понятие, концепции, тенденции развития // Стратегии бизнеса. 2018. № 6 (50). С. 43–49 <https://doi.org/10.17747/2311-7184-2018-5-43-49>
9. Hadi M.N.S., Yuan J.S. Experimental investigation of composite beams reinforced with GFRP I-beam and steel bars // Construction and Building Materials. 2017. № 144. С. 462–474. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.217>.
10. Ibrahim T.H., Allawi A.A., El-Zohairy A. Impact Behavior of Composite Reinforced Concrete Beams with Pultruded I-GFRP Beam // Materials. 2022. № 15, 441. <https://doi.org/10.3390/ma15020441>
11. Mahmood E.M., Allawi A.A., El-Zohairy A. Flexural Performance of Encased Pultruded GFRP I-Beam with High Strength Concrete under Static Loading // Materials. 2022. № 15, 4519. <https://doi.org/10.3390/ma15134519>

12. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Волкова С.В., Шумилова Е.Ю., Турчанинов Г.Е. Информационное моделирование в современном строительстве Цикл лекций - Белгород, 2022.

13. Римшин В.И., Бондаренко В.М., Бакиров Р.О., Назаренко В.Г. Железобетонные и каменные конструкции Учебник / (4-е издание)- М., 2007.

14. Обследование и испытание зданий и сооружений учебник для студентов вузов, обучающихся по специальностям "Промышленное и гражданское строительство" направления подготовки "Строительство" / (Изд. 4-е, перераб. и доп.) – М., 2012.

15. Техническая эксплуатация жилых зданий учебник для студентов высших учебных заведений, обучающихся по строительным специальностям / Сер. Для высших учебных заведений. (Изд. 3-е, перераб. и доп.) Москва, 2012.

16. Римшин В.И., Кецо Е.С., Трунтов П.С. Большой строительный словарь Том 2 П-Я – М., 2022.

17. Кришан А.Л., Римшин В.И., Астафьева М.А. Сжатые трубобетонные элементы. теория и практика – М., 2020.

18. Курбатов В.Л., Римшин В.И., Шубин И.Л., Волкова С.В. Информационное моделирование и искусственный интеллект в современном строительстве и жилищно-коммунальном хозяйстве – М., 2023.

19. Патент № 2811556 С1 Российская Федерация, МПК E04B 5/36. Строительный элемент : № 2023120363 : заявл. 02.08.2023 : опубл. 15.01.2024 / С. М. Анпилов, В. В. Бондарь, С. Н. Леонович [и др.]. – EDN SLQXTV.

20. Патент № 2820548 С1 Российская Федерация, МПК E04G 23/00. Способ реконструкции зданий и сооружений : № 2023123146 : заявл. 05.09.2023 : опубл. 05.06.2024 / С. М. Анпилов, В. В. Бондарь, В. Т. Ерофеев [и др.]. – EDN WGNQBR.

21. Применение нормативно-технических документов при проектировании и строительстве зданий и сооружений с использованием ЛСТК и настила армирующего "БИЗОН" / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, Г. В. Мурашкин, А. Н. Сорочайкин. – Тольятти : Автономная Некоммерческая Организация "Институт судебной строительно-технической экспертизы", 2021. – 82 с. – DOI 10.51608/1206572708. – EDN YOVHXL.

22. Патент № 2847475 С1 Российская Федерация, МПК E04G 23/00. Способ реконструкции покрытия здания : заявл. 09.12.2024 : опубл. 06.10.2025 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, Ю. Л. Сколубович, А. Н. Сорочайкин. – EDN DMLTPW.

23. Способы продления жизненного цикла зданий с деревянными перекрытиями / Ю. Л. Сколубович, С. М. Анпилов, Д. А. Добровольский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 9(789). – С. 88-103. – DOI 10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103. – EDN JDYWRB.

24. Анпилов, С. М. Инновационные технологии для быстровозводимых объектов массового строительства / С. М. Анпилов, Н. М. Зайченко, Л. Р. Маилян // Инженерная экономика : Материалы международной научно-технической конференции, Минск, 27–28 ноября 2024 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2024. – С. 610-629. – EDN WIKYFM.



25. Ильина, Л. В. Ускорение процесса схватывания цементных систем путем введения тонкодисперсного модификатора / Л. В. Ильина, С. М. Анпилов, Д. А. Цекарь // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2025. – № 5(797). – С. 96-104. – DOI 10.32683/0536-1052-2025-797-5-96-104. – EDN XAXTKF.

26. Анализ методов определения коэффициента интенсивности напряжений для изделий из древесины / В. П. Селяев, С. М. Анпилов, А. Л. Лазарев, И. В. Архипов // Эксперт: теория и практика. – 2025. – № 3(30). – С. 21-27. – DOI 10.51608/26867818_2025_3_21. – EDN SWYERE.

27. Техническая экспертиза несущих строительных конструкций административного здания в рамках его переустройства / С. М. Анпилов, В. И. Римшин, В. Л. Курбатов [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 3(18). – С. 28-33. – DOI 10.51608/26867818_2022_3_28. – EDN KSSAMC.

28. Методика определения долговечности твердых тел для частного случая термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования / А. В. Ерофеев, П. В. Монастырев, В. А. Езерский [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2025. – № 1(28). – С. 120-124. – DOI 10.51608/26867818_2025_1_120. – EDN UYEB5W.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 02.11.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 02.11.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья
УДК 691.17
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
BAK: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2025_4_104

ПОЖАРНАЯ ОПАСНОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

- © Авторы 2025
SPIN: 4139-5460 **СТЕНЕЧКИНА Ксения Сергеевна**
кандидат технических наук, доцент кафедры
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(Россия, Москва, e-mail: Stenechkina522@mail.ru)
- SPIN: 5079-4116 **ЕВТУШЕНКО Юрий Михайлович**
доктор химических наук, старший научный сотрудник
Институт синтетических полимерных материалов им. Н.С. Ениколопова РАН
(Россия, Москва)
- SPIN: 2315-7170 **УШКОВ Валентин Анатольевич**
доктор технических наук, профессор кафедры
Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет
(Россия, Москва)
- SPIN: 1439-1058 **БЕРЛИН Александр Александрович**
академик РАН, доктор химических наук, профессор
Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН
(Россия, Москва)

Аннотация. Рассмотрено влияние химической природы и содержания наполнителей, фосфор- и хлорсодержащих пластификаторов на термостойкость, воспламеняемость, горючесть и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов (ПКМ). Совокупность полученных авторами экспериментальных данных показала, что основным параметром, определяющим влияние наполнителей на воспламеняемость и горючесть ПКМ, является удельное количество поглощенного наполнителем тепла. Выявлено, что фосфатные пластификаторы являются малоэффективными антипиренами ПКМ на основе коксующихся полимеров.

Ключевые слова: воспламеняемость; горючесть; кислородный индекс; наполнитель; коэффициент дымообразования; пожарная опасность; пластификатор

Для цитирования: Пожарная опасность полимерных композиционных материалов / К.С. Стенечкина, Ю.М. Евтушенко, В.А. Ушков, А.А. Берлин // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 104-113. doi:10.51608/26867818_2025_4_104.

Original article

FIRE DANGER OF POLYMER COMPOSITE MATERIALS ABSTRACT

- © The Author(s) 2025 **STENETCHKINA Ksenia Sergeevna**
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, Moscow)
- YEVTUSHENKO Yuri Mikhailovich**
Doctor of Chemical Sciences, Senior Researcher
Institute of synthetic polymeric materials of the Russian Academy of Sciences
(Russia, Moscow)



USHKOV Valentin Anatolyevich

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department
National Research Moscow State University of Civil Engineering (Russia, Moscow)

BERLIN Alexander Alexandrovich

Academician of the Russian Academy of Sciences, Doctor of Chemistry, Professor
N.N. Semenov Federal Research Center for Chemical Physics, Russian Academy of Sciences
(Russia, Moscow)

Abstract. The influence of the chemical nature and content of fillers phosphorus- and chlorine-containing plasticizers on the heat resistance, flammability, burnability, and smoke-forming ability of polymer composite materials (PCM) is considered. The totality of experimental data obtained by the authors has shown that the main parameter determining the effect of fillers on the flammability and burnability of PCM is the specific amount of heat absorbed by the filler. It has been revealed that phosphate plasticizers are ineffective flame retardants based on coking polymers.

Keywords: flammability; burnability; oxygen index; filler; smoke generation coefficient; fire hazard; plasticizer

For citation: Fire danger of polymer composite materials abstract / K.S. Stenechikina, Yu.M. Yevtushenko, V.A. Ushkov, A.A. Berlin // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 104-113. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_104.

Введение. Полимерные композиты – полимерные материалы с относительно равномерным распределением твердых веществ (тонкодисперсных, волокнистых или тканых наполнителей) в объеме непрерывной полимерной матрицы с четко выраженной границей раздела фаз. Для улучшения технологических и эксплуатационных свойств ПКМ в состав полимерной матрицы вводят различные пластификаторы и модификаторы [1-3]. Основные принципы создания полимерных композитов с заданным комплексом эксплуатационных характеристик рассмотрены в работах [4-5]. Драйвером развития ПКМ являются авиация и космическая техника, инфраструктура и ветроэнергетика, газомоторный транспорт и судостроение, атомная энергетика и строительство. Анализ российского и мирового рынка ПКМ приведен в работе [6].

Обладая высокими технологическими и эксплуатационными характеристиками подавляющее большинство ПКМ легко воспламеняется и распространяет пламя по поверхности, образуя при этом опасные факторы пожара, приводящие к гибели людей и большому материальному ущербу [7-9]. В России в настоящее время значительно возросли требования к обеспечению пожарной безопасности зданий и сооружений, сформулированные в Федеральном законе РФ № 123-ФЗ от 22.06.2008 г. Поэтому разработка нового поколения ПКМ, обладающих пониженной пожарной опасностью и высокими эксплуатационными характеристиками, а также модификация промышленных многотонажных полимерных материалов с целью эффективного снижения их горючести и дымообразующей способности является важной и актуальной проблемой. Об этом свидетельствуют многочисленные публикации отечественных [10-12] и зарубежных [13-15] исследователей. Использование полимеров в качестве связую-

щих в интумесцентных огнезащитных составах и слабогорючих ПКМ на основе различных сочетаний антипиренов, обладающих синергетическим эффектом, представляет собой одно из наиболее динамично развивающихся разделов материаловедения [16].

Для научно-обоснованного решения указанной проблемы необходимо комплексное изучение всех процессов, протекающих при тепловом и огневом воздействии на ПКМ, установление взаимосвязи между химической природой и содержанием исходных компонентов с основными показателями пожарной опасности композитов. В статье приведены результаты экспериментальных исследований влияния химического строения и содержания основных компонентов ПКМ (полимеров, наполнителей и пластификаторов) на воспламеняемость, горючесть и дымообразующую способность ПКМ, широко используемых в строительной индустрии.

Объекты и методы исследования. В качестве объектов исследования использованы ПКМ на основе полиэтилена низкого давления марки 20208-002 (ГОСТ 16338-85), полипропилена марки 21007 (ГОСТ 26996-86), суспензионного ПВХ марок С7258-М и 7059-М (ГОСТ 14332-78), вторичных полиолефинов и ПВХ, эпоксидной смолы марки ЭД-20 (ГОСТ 10587-84), синтетического каучука марки СК-30АРКМ-15 (ГОСТ 11138-78) и шинного регенерата РШ (ТУ 38.404. 203-90). Полимерные композиты получены по общепринятым методикам. В качестве наполнителей применяли порошкообразные вещества со средним эквивалентным диаметром частиц 10-25 мкм, устойчивые до температуры 1000 °С (Al_2O_3 , Bi_2O_3 , CaF_2 , CaO , CuO , Fe_2O_3 , LiF , PbF_2 , Sb_2O_3 , TiO_2 , V_2O_5 , ZnO , Al , ZrO_2 , Zn и MgO), и неорганические соединения, разлагающиеся при температуре ниже 600 °С ($\text{Al}(\text{OH})_3$, $\text{Mg}(\text{OH})_2$, $\text{Ca}(\text{OH})_2$,



$\text{Ni}(\text{OH})_2 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$, MgCO_3 , талькомагнезит (смесь $\text{Mg}_3\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2$ - 56% и MgCO_3 - 30%) и другие наполнители). Термические свойства наиболее распространенных разлагающихся наполнителей приведены в табл. 1.

Таблица 1 - Термические свойства разлагающихся минеральных наполнителей

Показатели	Наполнители			
	MgCO_3	$\text{Al}(\text{OH})_3$	$\text{Mg}(\text{OH})_2$	CaCO_3
Температура, °С начала интенсивного разложения максимальной скорости разложения	197 438	233 308	332 379	620 729
Максимальная скорость разложения, %/мин.	5,97	5,27	6,8	5,02
Теплота разложения, кДж/кг	300,9	963,2	1093,0	-
Теплоемкость, кДж/(кг·К), при температуре, °С				
40	2,14	1,49	1,57	1,20
80	2,78	1,6	2,10	1,43
120	2,78	1,75	2,21	1,54
200	-	2,00	2,10	1,65

В качестве пластификатора использовали: дибутил-(ДБФ), диоктил-(ДОФ) и диалкилфталат (ДАФ-56), ди-(2-этилгексил)-фенилфосфат (ДАФФ), дифенил-(2-этилгексил) фосфат (ОДФФ), трифенилфосфат (ТФФ), дифенил(п-третбутил)фенилфосфат (ДФИБФФ) дифенилкрезилфосфат (ДФКФ), трихлорэтилфосфат (ТХЭФ), дифенилизопропилфенилфосфат (ТАФ-ЗОП) и трихлорпропилфосфат (ТХПФ), физико-химические свойства которых приведены в работе [12].

Термический анализ исследованных ПКМ проводили на воздухе и в токе азота при нагреве со скоростью 5,10 и 20°С/мин, с помощью автоматизированной модульной термоаналитической системы «DuPont9900». Критериями термостойкости ПКМ являлись температуры начала интенсивного разложения ($T_{\text{нр}}$) и максимальной скорости разложения ($T_{\text{мах}}$). Кислородный индекс (КИ), коэффициент дымообразования (D_m), температуры воспламенения (T_v) и самовоспламенения ($T_{\text{св}}$), теплоту сгорания (ΔH_c), критическую плотность теплового потока воспламенения ($q_{\text{кр}}$), предельную концентрацию кислорода ($c_{\text{пр}}$) и скорость распространения пламени по горизонтальной поверхности ($V_{\text{пр}}$) композитов при различной концентрации кислорода ($[\text{O}_2]$) в потоке окислителя ($\text{O}_2 + \text{N}_2$) определяли по ГОСТ 12.1. 044-2018, ГОСТ 24632-81, и по методикам, приведенным в работах [12; 17-18]. Концентрацию СО и CO_2 в продуктах флеш-пиролиза ПВХ-материалов при 800°С определяли соответственно с помощью газоанализаторов ОА-5501 и ОА-2209, а максимальный выход HCl^- на хроматографе «Цвет-104» с детектором по плотности и пиролитической приставкой типа ППТ.

Результаты и обсуждение.

Для производства ПКМ строительного назначения используют много-тонажные полимеры - первичные и вторичные полиолефины, ПВХ, полистирол, непредельные олигоэфиры, карбамидные, фенолформальдегидные, эпоксидные и фурановые олигомеры, полиуретаны и синтетические каучуки. Выбор исходных мономеров, олигомеров или полимеров для производства ПКМ зависит от требуемых технологических и эксплуатационных характеристик строительных изделий и конструкции, а также экономической целесообразностью их применения.

Термопластичные полимеры, используемые для производства строительных материалов, относятся к легковоспламеняемым материалам, T_v и $T_{\text{св}}$ которых не превышают соответственно 365 и 485 °С, а КИ равен 17,3-18,1%. Теплота сгорания указанных полимеров составляет 26380 - 46700 кДж/кг (табл. 2)[7,8]. Исключение составляют политетрафторэтилен(фторопласт), ПВХ и поливинилиденхлорид.

Синтетические каучуки и материалы на их основе относятся к горючим материалам: T_v и $T_{\text{св}}$ равны соответственно 220-325 °С и 280-420 °С, КИ и $c_{\text{пр}}$ ненаполненных вулканизаторов не превышают 19% и 21% соответственно (табл. 3). Исключение составляют резины на основе хлоропренового каучука марки КР-50 (КИ = 32,2%, T_v = 335°С, $T_{\text{св}}$ = 425°С). Влияние химической природы синтетических каучуков на горючесть материалов более заметно в условиях определения $c_{\text{пр}}$ наполненных вулканизаторов (табл. 3) при распространении пламени по горизонтальной поверхности. Зависимость КИ композитов от направления волны их горения обусловлена изменением тепловых потерь в ведущей кромке пламени (с их увеличением КИ материалов возрастает).

Таблица 2 - Показатели пожарной опасности термопластичных полимеров, используемых для производства ПКМ строительного назначения

Полимер	Температура, °С		Кислородный индекс, %	Теплота сгорания, кДж/кг
	воспламенения	самовоспламенения		
Полиметилметакрилат	280-320	440-465	17,3	26380-26600
Полиэтилен	306-365	350-420	17,4	46050-46700
Полипропилен	325-350	340-390	17,4	43950-46500
Полистирол	330-360	415-485	17,8-18,1	39800-40650
Поливинилхлорид	340-390	465-550	44,1-49,0	18000-20750
Поливинилиденхлорид	532	538	60	-
Политетрафторэтилен	560	570-580	95	4200-4600



Т_{св} густосетчатых полимеров на основе непредельных олигоэфиров, используемых в качестве связующих для производства стеклопластиков и полимербетонов, защитных покрытий, клеев, электроизоляционных, пропиточных и заливочных составов, не превышает 411°С, а КИ - 21,7%. Широкое применение в строительной индустрии получили и различные эпоксидные полимеры. При этом химическая природа используемых отвердителей определяет структуру трехмерной сетки эпоксидного полимера, оказывает существенное влияние на технологические и физико-механические свойства композиционных материалов. Однако химическое строение аминных отвердителей практически не влияет на горючесть и дымообразующую способность эпоксидных композиций [12]: КИ равен 21,2-23,1%, с_{пр} - 26,5-29,7%, а D_{мв} в режиме пиролиза и пламенного горения составляет соответственно 530-960 и 430-540 м²/кг(табл.4). При этом с_{пр} более чувствительна к химическому строению аминных отвердителей. Разница между значениями с_{пр}и КИ превышает 28%, что обусловлено большими теплопотерями при распространении пламени по горизонтальной поверхности композитов. V_{рп} эпоксидных композитов возрастает с 0,17 - 0,20 мм/с при [O₂] в потоке окислителя, равной 30%, до 0,32 - 0,69 мм/с при [O₂]=45% При этом с ростом содержания полиэтиленполиамин (ПЭПА) в связующем увеличивается не только степень отверждения эпоксидного олигомера ЭД-20, но и возрастает КИ полимера [12].

Следовательно, подавляющее большинство ПКМ на основе многоэтажных полимеров относится к горючим материалам с высокой дымообразующей способностью (D_м>500 м²/кг). Исключение составляют композиты на основе ПВХ и поливинилиденхлорида, карбамидных и фенолформальдегидных олигомеров. Снижение пожарной опасности полимерных композитов достигается за счет химической модификации связующих, применения эффективных наполнителей, фосфор- и борсодержащих замедлителей горения, дымоподавителей и синергистов, изменяющих механизм и макрокинетику пиролиза полимеров, росту коксообразования и снижению выхода горючих летучих продуктов, а также за счет изменения физической морфологической структуры ПКМ.

Эффективным методом повышения эксплуатационных характеристик, снижения пожарной опасности и стоимости ПКМ является применение эффективных наполнителей[20]. Наполнители вызывают значительные изменения надструктуры и свойств межфазного слоя композита, влияют на процессы пиролиза полимеров, тепло- и массообмен при горении ПКМ. Характер этих изменений зависит от содержания и химической природы наполнителя, дисперсности и формы его частиц, других факторов. По-

этому при разработке пожаробезопасных ПКМ важно знать влияние содержания и химической природы минеральных наполнителей на показатели пожарной опасности композитов.

Таблица 3 –Показатели пожарной опасности ненаполненных (числитель) и наполненных 45% мас. Mg(OH)₂ (знаменатель) синтетических каучуков [19]

Показатели	Марки каучука						
	Натуральный	Изопреновый СКИ-3	Бутадиен-стирольный СКС-30 АРКМ-15	Натрийбутадиеновый СКБ-35	Каучук смолонеполненный БС-45 АКН	Хлоропреновый КР-50	Бутадиеннитрильный СКН-40
Температура, °С воспламенения	<u>220</u> <u>245</u>	<u>300</u> <u>340</u>	<u>310</u> <u>340</u>	<u>240</u> <u>285</u>	<u>325</u> <u>355</u>	<u>335</u> <u>385</u>	<u>320</u> <u>380</u>
самовоспламенения	<u>280</u> <u>300</u>	<u>340</u> <u>385</u>	<u>355</u> <u>390</u>	<u>285</u> <u>300</u>	<u>380</u> <u>410</u>	<u>425</u> <u>460</u>	<u>420</u> <u>450</u>
Кислородный индекс, %	<u>17,9</u> 19,9	<u>18,3</u> 20,3	<u>18,5</u> 22,4	<u>18,3</u> 23,1	<u>18,9</u> 22,8	<u>32,2</u> 38,3	<u>18,9</u> 24,8
Предельная концентрация кислорода, %	<u>18,5</u> 23,2	<u>20,2</u> 25	<u>18,9</u> 39,6	<u>19,2</u> 45	<u>19,9</u> 33,6	<u>32,5</u> 60	<u>21</u> 45
Скорость распространения пламени, 10 ⁻² м/с, при концентрации кислорода в окислителе, %							
22,5	0,21	0,17	0,21	0,19	0,17	-	-
25,0	0,37	0,28	0,35	0,31	0,28	-	0,20
30,0	0,70	0,52	0,69	0,56	0,51	-	0,39
40,0	1,41	1,07	1,22	1,14	1,00	0,55	0,79
50,0	2,17	1,82	2,27	1,82	1,67	0,88	1,35
Удельная оптическая плотность дыма в режиме горения		233	325	309		695	286

Используя обычные для диффузионного горения полимеров предположения, с учетом тепловых потерь, связанных с конвективным теплообменом, условия теплового баланса при горении ПКМ в условиях КИ можно представить в виде уравнения [12]:

$$КИ = \frac{100 \cdot \gamma \cdot c_0 \cdot (T_f - T_0)}{H - L - c_T \cdot (T_f - T_s) - Q_{пот} - k \cdot q_n}, \quad (1)$$

где c₀, c_T — соответственно удельная теплоемкость окислителя и теплоёмкость газообразных продуктов разложения ПКМ;

H, L, Q_{пот} — удельные значения соответственно теплот сгорания и газификации полимерного материала, тепловых потерь от пламени;

T₀, T_s, T_f — соответственно температуры окружающей среды, горячей поверхности и пламени;



q_n - удельное количество тепла, поглощаемое наполнителем в процессе горения;
 m_0 , m_T , m_n - соответственно массовые потоки кислорода, топлива и наполнителя в ведущей кромке пламени;
 $k = \frac{m_n}{m_T}$ - относительная степень наполнения (отношение массы наполнителя к массе полимера).

Таблица 4 - Горючесть и дымообразующая способность пластифицированных эпоксидных композиций, наполненных андезитом (43% мас.) [12]

Марка отвердителя	Содержание отвердителей, мас.ч. на 100 мас.ч. ЭД-20	Кислородный индекс, %	Предельная концентрация кислорода, %	Скорость распространения пламени, мм/с, при [O ₂] в окислителе, 35%	Коэффициент дымообразования, м ² /кг, в режиме	
					пиролиза	пламенного горения
Полиэтилен-полиамин (ПЭПА)	8/12	$\frac{23,0}{22,1}$	26,9/28,3	$\frac{0,26}{-}$	$\frac{630}{700}$	$\frac{500}{520}$
Диэтилентриамин	8/12	$\frac{22,8}{22,9}$	29,3/27,7	$\frac{0,17}{0,17}$	$\frac{660}{580}$	$\frac{540}{510}$
Триэтилентетрамин	8/12	$\frac{23,7}{22,8}$	28,7/29,6	$\frac{0,2}{0,17}$	$\frac{890}{670}$	$\frac{540}{470}$
Моноцианэтил-диэтилентриамин марки УП-633М	12/20	$\frac{22,5}{22,1}$	30,9/28,3	$\frac{0,25}{0,20}$	$\frac{730}{530}$	$\frac{500}{470}$
Полиаминоалкили-мидазолины марки:						
УП-0640	14/20	$\frac{21,6}{21,2}$	27,9/26,5	$\frac{0,26}{0,21}$	$\frac{630}{860}$	$\frac{440}{480}$
УП-0641	18/22	$\frac{22,2}{23,1}$	28,5/28,0	$\frac{0,22}{0,18}$	$\frac{870}{960}$	$\frac{460}{490}$
УП-0642	20/30	$\frac{24,6}{23,1}$	29,2/29,7	$\frac{0,16}{0,15}$	$\frac{860}{960}$	$\frac{540}{430}$

Примечание - Содержание диоктилфталата равно 8,6 % мас.

Для композитов на основе полимеров, не образующих при пиролизе карбонизованный слой $k = \frac{m_n}{m_T}$ - отношение массы наполнителя к массе полимера, а на основе карбонизирующихся полимеров $k = \frac{m_n}{m_T \cdot (1 - \sigma)}$, где σ - степень карбонизации связующего. В ведущей кромке пламени значения T_f колеблются в пределах от 700...800 до 1200 °С, поэтому значение $(T_f - T_0)$ принято постоянным (-1000 °С) для

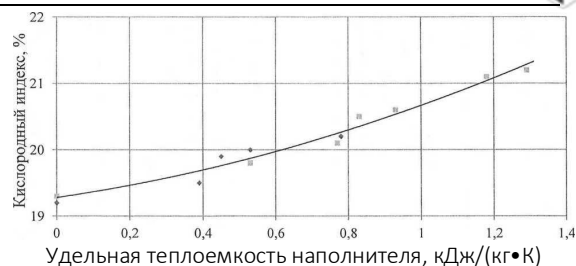


Рисунок 1 - Зависимость КИ полимерных композитов от удельной теплоемкости неразлагающихся минеральных наполнителей при их содержании 45,3 мас. %

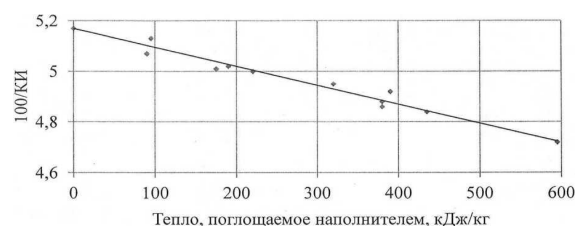


Рисунок 2 - Зависимость КИ пластифицированного полимера ЭД-20 и резин на основе синтетического каучука марки СКС-30АРКМ-15 от величины $k \cdot q_n$ неразлагающихся наполнителей

Таблица 5 – Воспламеняемость и горючесть наполненных эпоксидных композиций [21]

Наполнители	Показатели						
	Т _{св} °С	КИ, %	С _{спр} , %	q _{кр} , кВт/м ²	V _{гп} при [O ₂] в потоке окислителя, 35%, мм/с	D _m , м ² /кг в режиме	
						пиролиза	пламенного горения
—	470	19,3	20,1	10,3	0,41	1470	800
CaO	480	21,2	26,8	11,7	0,25	520	350
CaCO ₃	495	20,5	25,3	11,4	0,23	790	390
Ca(OH) ₂	480	20,1	24,0	11,2	0,30	410	290
MgO	490	20,6	25,6	11,7	0,25	720	400
Al ₂ O ₃	490	20,1	23,5	10,8	0,24	800	460
Ba(OH) ₂	480	22,1	30,2	14,3	0,10	650	370
CuO	480	19,8	21,2	10,6	0,25	590	480
Fe ₂ O ₃	500	22,9	26,7	-	0,25	760	500
Sb ₂ O ₃	510	20,6	25,4	11,2	0,13	630	470

Примечание — Содержание наполнителей — 43,5 мас.%, пластификатора (диоктилфталата) — 8,7 мас. %.

всех исследованных ПКМ. Постоянной можно считать и значение T_s наполненных композитов: $(T_s - T_0) = 600^\circ\text{C}$ [12]. Влияние минеральных наполнителей на диффузионное горение ПКМ связано с дополнительными затратами тепла на их нагрев до T_s . Из уравнения 1 следует, что удельное количество тепла, поглощаемое неразлагающимся наполнителем при диффузном горении ПКМ, равно: $k \cdot q_n = k \cdot c_{уд} \cdot (T_s -$



T_0), где $c_{уд}$ - удельная теплоемкость наполнителя. Поэтому ПКМ, наполненные неразлагающимися наполнителями из условия $k \cdot q_n = \text{const}$, имеют близкие значения КИ, а их химическая природа незначительно влияет на предельные характеристики горения композитов. Для эпоксидных наполненных полимеров КИ равен 19,8...22,9%, $c_{пр}$ - 21,2...26,8%, $T_{св}$ - 480...510°C, $q_{кр}$ - 10,6...14,3 кВт/м² (табл. 5). Зависимость КИ композитов от $c_{уд}$ минеральных наполнителей приведена на рис. 1. Полученные экспериментальные данные ложатся на прямую в координатах 100/КИ от $k \cdot q_n$ независимо от вида использованного наполнителя (рис. 2), а хорошее согласие экспериментальных результатов с линейной зависимостью соблюдается во всем диапазоне наполнения полимеров.

Таблица 6- Воспламеняемость и горючесть наполненного вторичного ПВХ

Показатели	Вторичный ПВХ	Наполнители				
		каолин	мел	Al(OH) ₃	Mg(OH) ₂	талькомагнезит
Температура, °C						
$T_{нр}$	213	203	210	200	215	200
$T_{св}$	400	440	440	450	440	410
КИ, %	28,3	30,9	27,9	32,2	29,6	28,9
$c_{пр}$, %	40	60	45	55	50	50
D_m , м ² /кг, в режиме пиролиза	1090	510	750	650	910	570
пламенного горения	580	270	300	190	330	270

Примечание - Содержание разлагающихся наполнителей — 20 мас. %.

Тепло, поглощаемое к разлагающимися наполнителями, в условиях горения ПКМ, расходуется на их нагрев до температуры разложения и остатка до T_s , теплоту разложения и нагрев летучих продуктов разложения до T_f . Основной вклад в теплоглощение разлагающихся наполнителей вносит теплота их разложения. Так, например, для Al(OH)₃ теплота разложения составляет более 70% от суммарной величины теплоглощения наполнителя. В качестве примера в табл.6 представлены данные о влиянии разлагающихся наполнителей на показатели пожарной опасности ПВХ [22]. Из табл. 6 следует, что минимальной горючестью обладает ПВХ, наполненный Al(OH)₃. Незначительно уступает Al(OH)₃ по эффективности пламягасящего действия каолин, который в интервале температур 400-550°C теряет химически связанную воду, переходя в метаксаинит. Низкая эффективность Mg(OH)₂ обусловлена его высокой термостойкостью ($T_{нр}$ превышает 330°C), по сравнению с $T_{нр}$ вторичного ПВХ (~185°C).

Поэтому важным фактором, влияющим на эффективность разлагающихся наполнителей, является близость температур дегидратации наполнителя и $T_{нр}$ полимера. При этом образующийся при дегидрохлорировании полимера HCl адсорбируется на поверхности наполнителя и не участвует в процессах флегматизации пламени и ингибирования радикальных цепных процессов в газовой фазе [22].

С ростом степени наполнения закономерно снижается пожарная опасность ПКМ. С увеличением содержания наполнителей до 61% мас. T_b и $T_{св}$ композитов возрастает соответственно на 10-45 и 10-65°C (рис. 3). КИ полипропилена, резин на основе СКС-3ОАРКМ-15 и полимера ЭД-20 повышается соответственно с 17,4; 19,1 и 19,4% до 19,1-19,4; 22,8-23,4 и 20,3-21,5%. Низкие значения T_b пластифицированного эпоксидного полимера обусловлены высокой воспламеняемостью использованного пластификатора - диоктилфталата ($T_{всп} = 151^\circ\text{C}$, $T_{св} = 358^\circ\text{C}$), который при нагревании ПКМ легко мигрирует на поверхность композита.

Для исследованных наполнителей в широком диапазоне наполнения с удовлетворительной степенью точности выполняется линейная зависимость величины 100/КИ композитов от их относительного содержания [12]. При этом тангенс угла наклона прямых к оси абсцисс ($\text{tg}\alpha$) пропорционален величине q_n . В соответствии с уравнением (1) $\text{tg}\alpha$ равен:

$$\text{tg}\alpha = \frac{q_n}{\gamma \cdot c_o \cdot (T_f - T_0)}, \quad (2)$$

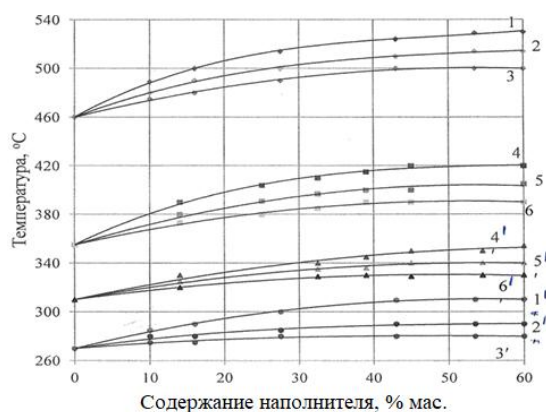


Рисунок 3 - Зависимость температур воспламенения (1', 2', 3', 4', 5', 6') и самовоспламенения (1, 2, 3, 4, 5, 6) ПКМ от содержания наполнителей: 1, 1' - Al(OH)₃; 2, 2', 4, 4' - Mg(OH)₂; 3, 3', 6, 6' - мел; 5, 5' - каолин; 1, 2, 3, 1', 2', 3' - композиты на основе пластифицированного полимера ЭД-20; 4, 5, 6, 4', 5', 6' - композиты на основе синтетического каучука СКС-3ОАРКМ-15

Для полиолефинов, разлагающихся при повышенных температурах практически полностью, $\text{tg}\alpha$ имеет более высокие значения, чем для полимеров, склонных к карбонизации (табл. 7). Величина $\text{tg}\alpha$ может быть использована для нахождения стехиометрического коэффициента сгорания ПКМ. Этот вывод



служит косвенным подтверждением достоверности тепловой модели снижения горючести ПКМ, основанной на тепловой теории пределов горения Я.Б. Зельдовича [23].

Линейный характер зависимости $100/KI$ от величины KI позволяет получить простое эмпирическое выражение для расчета величины кислородного индекса полимерных композитов:

$$KI = 100 / (A - B \cdot k \cdot q_n), \quad (3)$$

где A - отношение $100/KI$ полимерного связующего; B - коэффициент пропорциональности. Для полиолефинов: $KI = 100 / (5,7 - 1,6 \cdot k \cdot q_n)$.

В таком виде расчетное соотношение хорошо описывает все результаты экспериментальных исследований по оценке горючести ПКМ методом KI . Оно применимо и для композиций, содержащих смесь различных наполнителей. В этом случае величина $k \cdot q_n$ представляет собой сумму произведений $\Sigma(k \cdot q_n)$, соответствующих каждому компоненту комбинированного наполнителя.

Таблица 7 - Значение $tg\alpha$ для ПКМ, содержащих различные минеральные наполнители

ПКМ на основе	Наполнитель	$tg\alpha$
Полипропилена	$CaCO_3$	1,25
	TiO_2	1,36
	ZnO	1,54
Полиэтилена	PbO	0,08
	Al	0,21
	Al_2O_3	0,25
	LiF	0,35
	Al_2O_3	0,94
Пластифицированного полимера ЭД-20	$CaCO_3$	0,04
	CaO	0,13
	$CaCO_3$	0,24
	SiO_2	1,07
	$CaCO_3$	1,2
	TiO_2	1,25
	ZnO	1,32
Синтетического каучука марки СКС-30АРКМ-15	PbO	0,67
	Al	0,72
	Al_2O_3	0,77
	LiF	1,39
	Al_2O_3	1,57

В таблице 8 приведены значения $tg\alpha$, $\gamma_{эксп}$ и коэффициента полноты сгорания $\delta = \gamma_{эксп}/\gamma_{теор}$ ПКМ, рассчитанные по экспериментальным данным. Теоретический стехиометрический коэффициент сгорания рассчитан из условия полного сгорания продуктов пиролиза ПКМ до CO_2 и H_2O . Из табл.7 следует, что по эффективности пламегасящего действия $Al(OH)_3$ в 2,7-3,1 раза превосходит все неразлагающиеся наполнители. Точка пересечения прямых с осью абсцисс (k_0) может быть использована для определения тепловых потерь от пламени при свечевом горении ПКМ (рис. 4):

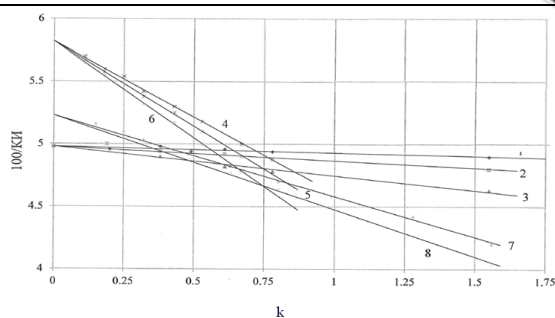


Рисунок 4 - Зависимость воспламеняемости ПКМ от относительного содержания неразлагающихся наполнителей: 1 - Al_2O_3 ; 2,4,7 - $CaCO_3$; 3 - CaO ; 5 - TiO_2 ; 6 - ZnO ; 8 - SiO_2 , 1,2,3 - композиты на основе пластифицированного полимера ЭД-20; 4,5,6 - композиты на основе полипропилена; 7,8 - композиты на основе каучука СКС-30АРКМ-15.

Хорошее согласие полученных значений коэффициентов $\gamma_{эксп}$ и $\gamma_{эксп}/\gamma_{теор}$ для ПКМ с аналогичными значениями для газообразных топлив показывает, что на пределе свечевого диффузионного горения конденсированная фаза не оказывает существенного влияния на термохимические характеристики топлива. В ведущей кромке пламени при свечевом горении полимеров с точностью до 20% сохраняется постоянное соотношение H/γ , равное 13400 кДж/кг кислорода.

Таблица 8 - Термохимические характеристики полимерных композитов на пределе свечевого горения [12]

Полимер	Термохимические показатели					
	$T_s - T_0, ^\circ C$	$tg\alpha$	$\gamma_{эксп}$	$\gamma_{эксп}/\gamma_{теор}$	$H-L, \text{кДж/кг}$	$Q/\gamma, \text{кДж/кг}$
Полиэтилен	600	0,32 1,0	2,7 2,5	0,73	33472	5857,6
Полиоксиметилен	580	1,0 2,7	0,85 0,92	0,82	11715	5857,6
Полистирол	580	1,1	2,4	0,72	29706	5439
Полиметилметакрилат	560	0,35 0,57	1,4 1,5	0,76	19200	5900
АБС-пластик	580	0,40 1,1	2,1 2,2	0,70	28451	5899
Термопластичный полиуретан	570	0,47 1,3	1,8 1,8	0,80	23012	6276

Примечание - В числителе приведены данные для ПКМ, наполненные LiF , в знаменателе - $Al(OH)_3$.

Таким образом, совокупность полученных авторами экспериментальных данных показывает, что основным параметром, определяющим влияние неорганических наполнителей на горючесть ПКМ, является удельное количество тепла поглощаемое наполнителем. Важным фактором, влияющим на эффективность гидратсодержащих веществ, является близость температуры дегидратации наполнителя и $T_{нр}$ полимеров.



Среди промышленных марок хлор- и фосфор-содержащих пластификаторов, используемых для производства ПКМ строительного назначения, широкое распространение получили хлорированные парафины и органические эфиры о-фосфорной кислоты, термохимические характеристики горения которых на пределе свечного горения приведены в табл. 9 [12].

Таблица 9 - Термохимические характеристики горения пластификаторов на пределе свечного горения

Пластификатор	$T_s - T_o, ^\circ\text{C}$	$\gamma_{\text{эксп}}$	α	H-L, кДж/кг
Дибутилфталат	430	1,4	0,62	19300
Диоктилфталат	460	2,0	0,77	26400
Диалкилфталат, C ₅ -C ₆	440	1,3	0,57	18000
Трихлорэтилфосфат	440	0,65	0,70	5900
Трихлорпропилфосфат	450	0,93	0,75	9270
Дифенил(п-третбутил)фенилфосфат	500	1,7	0,74	19300
Ди-(2-этилгексил)фенилфосфат	470	1,7	0,75	20900
Дифенилизопропилфенилфосфат	500	1,8	0,82	20500
Триалкилфосфат, C ₇ -C ₉	460	1,7	0,77	22200

Примечание - Ошибка определения $\gamma_{\text{эксп}}$ и α не превышает 7%. H и L - удельные значения теплоты сгорания и газификации пластификатора соответственно.

Горючесть промышленных марок фталатных и фосфатных пластификаторов зависит от концентрации в молекуле пластификатора атомов фосфора, хлора и бензольных ядер. При этом КИ фталатных пластификаторов не превышает 17%, а кислородный индекс фосфатных пластификаторов, не содержащих атомов хлора - 23,2%. КИ ТХПФ и ТХЭФ, содержащих соответственно 32,5 и 37,3% хлора, равен 26,4 и 29,9%. Горючесть хлорпарафинов существенно зависит от длины цепи и концентрации хлора в молекуле хлорсодержащего соединения: КИ составляет для ХП-470, Парахлор-380 и ХП-1100 соответственно 24, 32 и 48/%.

Фосфатные пластификаторы практически не снижают пожарную опасность ПКМ на основе эпoxидных полимеров (табл. 10) и синтетических каучуков, но повышают воспламеняемость ПВХ-материалов [24] Низкая эффективность пламягасящего действия промышленных марок фосфатных пластификаторов обусловлена их относительно высокой горючестью: КИ пластификаторов равен 19,6...29,9 % по сравнению с 22,1...22,3% для эпoxидного полимера марки ЭД-20, 20,8...22,2% для резин на основе СК-30АРКМ-15 и 44,1...47,2% для жесткого ПВХ. КИ полимера ЭД-20, отвержденного ПЭПА и содержащего 8,3...15,4 мас. % фосфатных пластификаторов, повышается с 22,1 до 23,2...24,0 94, а $T_{\text{св}}$ возрастает с 470 до 500...510 $^\circ\text{C}$ (табл. 10). Замена индустриального масла И-8А в резинах на основе синтетических кау-

чуков фосфатными пластификаторами повышает $T_{\text{в}}$ и $T_{\text{св}}$ соответственно с 320 и 380 $^\circ\text{C}$ до 330-340 $^\circ\text{C}$ и 390-400 $^\circ\text{C}$, а КИ возрастает с 20,8 до 22,2 - 22,9 94 %. Снижение КИ, повышение $q_{\text{кр}}$ и $V_{\text{р.п.}}$ для ПКМ, содержащих фосфатные пластификаторы, обусловлено их выпотеванием из композитов и воспламенением под действием внешнего теплового потока. Увеличение дымообразующей способности пластифицированных ПКМ связано с ростом концентрации фенольных ядер в фосфатном пластификаторе и, следовательно, с повышением содержания ароматических соединений в продуктах пиролиза композитов. Это подтверждается и ростом содержания твердой фазы дыма.

Таблица 10 - Показатели пожарной опасности пластифицированных композитов на основе эпoxидного полимера ЭД-20 [24]

Пластифика- тора	Показатели					V _{р.п.} , мм/с, при [O ₂] в окис- лителе, 35%
	КИ, %	T _{св} , °C	q _{кр} , кВт/м ²	D _m , м ² /кг, в режиме		
				пиро- лиза	пла- мен- ного горе- ния	
—	22,1	470	11,7	980	990	0,42
ТФФ	24,1	510	9,1	1010	800	0,37
ДФКФ	22,6	510	10,2	970	820	0,57
ОДФФ	22,9	500	10,3	640	840	0,38
ТАФ-ЗОП	24,0	500	9,0	900	770	0,30
ДФИБФФ	23,6	500	9,2	870	780	0,34
ДАФФ	23,6	480	9,3	650	870	0,34
ТХПФ	24,0	510	8,8	610	930	0,36
ТХЭФ	26,0	510	8,3	1080	790	0,42

Примечание - Содержание фосфатных пластификаторов - 15,4% мас.

Наличие в молекуле фосфатного пластификатора атомов хлора приводит к снижению $\Delta H_{\text{с}}^{\text{ПВХ}}$ -материалов и уровня выделения CO₂ при их горении, но и к резкому уменьшению D_m в режиме пиролиза и уровня выделения CO₂. В то же время выход CO возрастает вследствие ингибирования HCl радикальных цепных процессов в газовой фазе, концентрация которого в продуктах пиролиза максимальна. С повышением их содержания наблюдается закономерное повышение горючести (рис.5).и D_m ПВХ-материалов, особенно в режиме пиролиза (рис.6). При этом наблюдается линейная зависимость D_m ПВХ-материалов от содержания пластификаторов (рис. 6), что свидетельствует об аддитивном вкладе полимера и пластификатора на дымообразующую способность. С точки зрения пожарной опасности для композитов на основе пластифицированного ПВХ наиболее эффективным промышленным фосфатным пластификатором является ТХПФ.

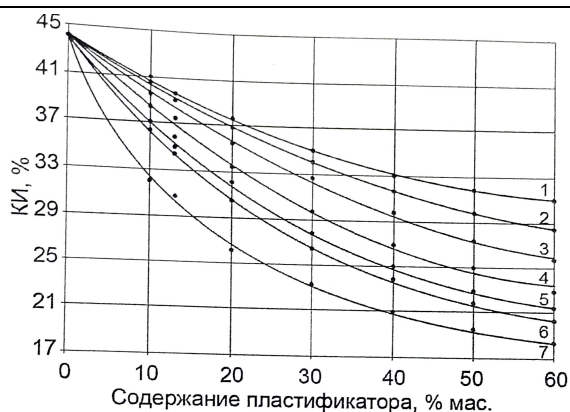


Рисунок 5 - Зависимость КИ ПВХ-материалов от содержания фталатных и фосфатных пластификаторов: 1 - трихлорэтилфосфат; 2 - трихлорпропилфосфат; 3 - дифенил(изопропил)фенилфосфат; 4 - дифенилкрезилфосфат; 5 - ди-(2-этилгексил)фенилфосфат; 6 - дибутилфталат; 7 - ди-(2-этилгексил)фталат

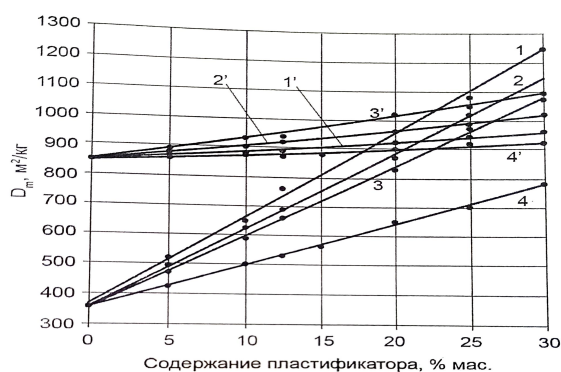


Рисунок 6 - Зависимость воспламеняемости ПКМ от относительного содержания неразлагающихся наполнителей: 1 - Al_2O_3 ; 2,4,7 - $CaCO_3$; 3 - CaO ; 5 - TiO_2 ; 6 - ZnO ; 8 - SiO_2 ; 1,2,3 - композиты на основе пластифицированного полимера ЭД-20; 4,5,6 - композиты на основе полипропилена; 7,8 - композиты на основе каучука СК-30АРКМ-15

Более высокой эффективностью пламягасящего действия обладают хлорированные парафины, несмотря на ограничительные меры по экологическим соображениям [25]. Они практически не влияют на термостойкость ($T_{нр} = 160-170^\circ C$) композитов на основе синтетических каучуков. При марки Парахлор-380 превосходит по эффективности не только промышленные марки хлорпарафинов, но и хлор-бромсодержащие парафины, синтезированные в лабораторных условиях. Хлорпарафин марки Парахлор-380 позволяет получить слабогорючие эпоксидные композиты с $KI = 32-34\%$, $T_{св} 500-510^\circ C$ и высокими эксплуатационными показателями [12]. При этом эпоксидные композиты, пластифицированные Парахлор-380, более стойки к воздействию агрессивных сред по сравнению с ПКМ, пластифицированными ДОФ и ДБФ.

Заключение. В результате выполненных экспериментальных исследований показано, что в большинстве случаев использование минеральных наполнителей не позволяет эффективно снижать горючесть ПКМ. В то же время гидроксиды Al , Mg могут существенно повысить стойкость к горению ПКМ при их достаточно высоком содержании (более 50%). При таком содержании наблюдается значительное снижение физико-механических свойств строительных композитов. Фосфорсодержащие пластификаторы, в том числе содержащие хлор, также незначительно снижают горючесть ПКМ. Более эффективными антипиренами-пластификаторами являются хлорированные парафины. Несмотря на ограничение их использования по экологическим соображениям эти пластификаторы по-прежнему используются в производстве специальных ПКМ. Эффективное повышение стойкости к горению ПКМ может быть достигнуто применением эффективных фосфор (бор) содержащих антипиренов или использованием огнезащитных составов интумесцентного типа. Эти два направления нашли широкое отражение в современных исследованиях, но ресурс перспективных направлений далеко не исчерпан.

Библиографический список

1. Каблов В.Ф. Проблемы современной технологии полимеров. – Волгоград: Изд.: ВПИ (филиал ВГТУ). – 2019. – 325с.
2. Кудинов В.В., Корнеева Н.В., Крылов И.К. Влияние компонентов на свойства полимерных композиционных материалов. – М.: Наука. – 2021. – 133с.
3. Иржак В.И. Эпоксидные полимеры и композиты с эпоксидной матрицей. – М.: РАНю - 2022. – 288с.
4. Берлин А.А. Вольфсон С.А., Ошмян В.Г., Ениколопов Н.С. Принципы создания композитных материалов. – М.: Химия. – 1990. – 238с.
5. ShenJ, LiangJ, LinX, LinH, YuJ, WangS. TheFlame-RetardantMechanismsandPreparationofPolymerCompositesandTheirPotential Application in Construction Engineering. Polymers (Basel). 2021 Dec 27;14(1):82. doi 10.3390/polym140100821.
6. Доршомедов М.С. Российский и мировой рынок полимерных композитов (обзор) // Труды ВИАМ. -2020. - №6-7 (89). -С.29-37.
7. Асеева Р.М., Зайков Г.Е., Горение полимерных материалов. – М.: Наука. – 1981. – 280 с.
8. Баратов А.Н., Андрианов Р.А., Корольченко А.Я. и др. Пожарная опасность строительных материалов. под ред. А.Н. Баратова – Москва: Стройиздат. - 1988. – 380с.
9. Михайлин Ю.А. Тепло-, термо- и огнестойкость полимерных материалов - Санкт-Петербург: Научные основы и технологии. - 2011. - 415 с.
10. Копылов В.В., Новиков С.Н., Оксентьевич и др. Полимерные материалы с пониженной горючестью. -М.: Химия. - 1986.-221 с.
11. Барботько С.Л., Вольный О.С., Кириенко О.А., Шуркова Е.Н. Оценка пожаробезопасности полимерных материалов авиационного назначения: анализ состояния,



методы испытаний, перспективы развития, методические особенности. Под общей редакцией академика РАН, профессора Е.Н. Каблова – М.: ВИАМ, 2018. -407 с

12. Ушков В.А. Разработка научных основ получения полимерных строительных материалов с пониженной пожарной опасностью: автореферат дис. доктора техн. наук :05.16.09. – НИУ МГСУ, - Москва. - 2020. – 46с.

13. Bakis C., BanK L., Brown Y., Cosenza E., DavalosГ, LeskoГ, Machida, A., Rizkalla S., Triantafyllou T., Fiber-Reinforced Polymer Composites for Construction - State-of-the-Art Review // J. Compos. Constr. - 2002. - Vol. 6. - № 2. - PP. 73-87.

14. Karbhari V., Chin Г, Hunston D., Benmokrane B., Juska T., Morgan R., LeskoЛ, Sorathia U., Reynaud Г). Durability баp Analysis for Fiber-Reinforced Polymer Composites in Civil Infrastructure // J. Compos. Constr. - 2003. - Vol. 7. - № 3. - PP. 238-247.

15. Mouritz A.P., Gibson A.G. Fire Properties of Polymer Composite Materials. Dordrecht: Springer. - 2006. – 400 p.

16. Evtushenko Yu.M., ToirovS.Kh.,Ushkov V.A., Berlin A.A. New Phosphorus-Nitrogen-Containing Flame Retardants for Composite Materials Based on Condensation Polymers // Polymer Science – Series D. -2025. – Vol.18. - #2. – p.429-434. <http://dx.doi.org/10.1134/s1995421225700327>.

17. Филин Л.Г. Лабораторный метод оценки эффективности наполнителей и добавок, вводимых в пластмассы // Пожаровзрывобезопасность веществ и материалов: Сб. трудов. – М. ВНИИПО МВД СССР. - 1981. – С.182-185.

18. Лалаян В.М. Экспериментальное изучение закономерностей распространения ламинарного пламени

по поверхности полимеров: автореферат дис.канд.хим.наук: 02.00.06 – Москва. - 1980. -22с.

19. Ушков В.А., Лалаян В.М., Абишев А.К., Морозова Н.Ю. Закономерность воспламенения и горения резин // Каучук и резина. -1986. -№3. –С. 8-11.

20. Gupta R., Singh M.K., Rangappa S.M., Siengchin S., Dhakal H.N., Zafar S. Heliyon. Recent progress in additive inorganic flame retardants polymer composites // Degradation mechanisms, modeling and applications. – 2024. – Oct 22; 10(21):e39662. doi: 10.1016/j. helliyon.2024.e39662.eCollection 2024 Nov 15. PMID: 39524801.

21. Ушков В.А., Лалаян В.М., Ломакин С.М., Невзоров Д.И. О влиянии неразлагающихся наполнителей на воспламеняемость и дымообразующую способность полимерных композиционных материалов // Пожаровзрывобезопасность. - 2013. - Том 22. - N 6. - С. 32-39.

22. Ушков В.А., Лалаян В.М., Ломакин С.М., Невзоров Д.И., Горючесть и дымообразующая способность полимерных композиционных материалов с разлагающимися минеральными наполнителями // Пожаровзрывобезопасность. - 2013. - Том 22. - N 8. - С. 15-24.

23. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М.Математическая теория горения и взрыва. – Москва: Наука. - 1980. – 478с.

24. Ушков В.А., Невзоров Д.И., Булгаков Б.И., Лалаян В.М., Влияние пластификаторов на пожарную опасность полимерных строительных материалов // Строительные материалы. – 2014. – N 3. - С. 96-102.

25. Zhu, J., Zhang J., Fu, J. et al. A Review of Chlorinated Paraffins: Occurrence in Soil, Regulation and Remediation Technologies. Reviews Env. Contamination (formerly: Residue Reviews) 263, 22 (2025). <https://doi.org/10.1007/s44169-025-00097-1>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 19.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 19.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья
691.327.973:661.185.7
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
БАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2025_4_114

**ПОЛУЧЕНИЕ БЕЛКОВОГО ПЕНООБРАЗОВАТЕЛЯ ИЗ ВТОРИЧНЫХ ПРОДУКТОВ ПРОИЗВОДСТВА
ЭТИЛОВОГО СПИРТА И РАЗРАБОТКА СОСТАВОВ ПЕНОБЕТОНОВ НА ЕГО ОСНОВЕ**

© Авторы 2025
SPIN: 3528-7452

ЧЕРКАСОВ Василий Дмитриевич
член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Прикладной механики»
РААСН; Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
(Россия, Саранск, e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru)

SPIN: 6345-0914

ЕМЕЛЬЯНОВ Алексей Иванович
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Прикладной механики»
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
(Россия, Саранск)

SPIN: 8080-4780

КИСЕЛЕВ Евгений Викторович
кандидат технических наук, доцент кафедры
«Прикладной механики»
Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева
(Россия, Саранск)

Аннотация. В статье приводятся результаты исследований по получению белкового пенообразователя строительного назначения из вторичных продуктов производства этилового спирта. Разработка пенообразователя проводилась с использованием сухой зерновой послеспиртовой барды. Установлены оптимальные условия использования белкового гидролизата, способствующие получению стабильной пенной структуры пенобетона. Получены зависимости прочности и плотности пенобетона от таких факторов, как количество наполнителя и продолжительность перемешивания растворной смеси. Разработаны составы, позволяющие получать пенобетонные стеновые материалы с высокими физико-техническими характеристиками.

Ключевые слова: пенобетон; пенообразователь; пенообразующие свойства; коэффициент конструктивного качества; щелочной гидролиз; послеспиртовая барда

Для цитирования: Черкасов В.Д., Емельянов А.И., Киселев Е.В. Получение белкового пенообразователя из вторичных продуктов производства этилового спирта и разработка составов пенобетонных на его основе // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 114-117. doi:10.51608/26867818_2025_4_114.

Original article

**PRODUCTION OF PROTEIN FOAMING AGENT FROM SECONDARY PRODUCTS OF ETHYL
ALCOHOL PRODUCTION AND DEVELOPMENT OF FOAM CONCRETE COMPOSITIONS BASEDONIT**

© The Author(s) 2025

CHERKASOV Vasily Dmitrievich
Corresponding Member of the RAACS, Dr. of Technical, Prof.,
Head of the Department
RAACS; National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev
(Russia, Saransk, e-mail: vd-cherkasov@yandex.ru)

YEMELYANOV Alexey Ivanovich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev
(Russia, Saransk)



KISELYOV Evgeny Viktorovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department
National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev
(Russia, Saransk)

Abstract. The article presents the results of research on the production of protein foaming agent for construction purposes from secondary products of ethyl alcohol production. The development of the foaming agent was carried out using dry grain after-alcohol bard. Optimal conditions for the use of protein hydrolysate have been established, contributing to the production of a stable foam structure of foam concrete. The dependences of the strength and density of foam concrete on such factors as the amount of filler and the duration of mixing of the mortar mixture are obtained. Compositions have been developed that make it possible to obtain foam concrete wall materials with high physical and technical characteristics.

Keywords: foam concrete; foaming agent; foaming properties; coefficient of structural quality; alkaline hydrolysis; post-alcohol bard

For citation: Cherkasov V.D., Yemelyanov A.I., Kiselyov E.V. Production of protein foaming agent from secondary products of ethyl alcohol production and development of foam concrete compositions based on it // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 114-117. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_114.

Введение. Среди основных направлений строительной отрасли особое место уделяется вопросам рационального использования ресурсов и энергии при возведении зданий и их эксплуатации. Проблема ресурсосбережения решается путем разработки и внедрения энергоэффективных строительных материалов, в первую очередь стеновых.

К числу эффективных стеновых материалов относятся пенобетоны, обладающие отличными тепло-техническими качествами и эксплуатационными показателями. Существенное влияние на физико-механические свойства пенобетонных материалов оказывают вид и свойства используемого пенообразователя. Выбор пенообразующей добавки обуславливает как технологию производства пенобетона, так и эксплуатационные характеристики получаемых изделий.

В настоящее время выпускается широкий ассортимент пенообразующих добавок и накоплен большой объем экспериментальных данных по применению их растворов [1-9]. Исходя из технико-экономических, производственно-технологических и экологических требований, предъявляемых к пенообразователям строительного назначения, наиболее приемлемыми остаются пенообразователи на основе белок содержащих веществ. Следует отметить, что сырьевая база таких пенообразователей является весьма ограниченной.

Цель работы – получение белкового пенообразователя из вторичных продуктов производства этилового спирта и разработка на его основе составов пенобетонов естественного твердения.

Послеспиртовая барда содержит протеинов, около 27 % от массы сухих веществ, которые могут послужить исходным сырьем для получения поверхностно-активных веществ (ПАВ) строительного назначения. Сухие вещества барды состоят из белков, целлюлозы, декстринов, жира, минеральных и

других веществ. Благодаря азотистым веществам дрожжей, содержание белков в сухом веществе барды, примерно, в два раза выше, чем в исходном зерновом сырье [10], то есть в спиртовой барде содержатся белковые вещества как растительного происхождения, так и микробного.

Белковые пенообразователи получают, как правило, путем частичного гидролиза белоксодержащего сырья в водной среде в присутствии гидроксид-ионов OH^- в качестве катализатора. В результате образуются фрагменты белковых молекул, с концевыми $-\text{COO}^-$ и $-\text{NH}_2$ группами. Образующиеся в процессе гидролиза молекулы имеют дифильный характер и, следовательно, обладают поверхностно-активными свойствами. Благодаря наличию указанных функциональных групп, а также возможности их образовывать водородные связи с поверхностью различных минералов [11], они будут хорошо адсорбироваться на поверхностях частиц заполнителей цемента, с одной стороны, и химически фиксироваться на гидратных новообразованиях цемента ($\text{SiO}(\text{CaOH})$) с образованием монослоев ПАВ на границе раздела фаз «гидратирующийся цемент – жидкость» с другой стороны. Благодаря этим процессам адсорбции можно ожидать, что применение указанные ПАВ позволит получить устойчивую цементную пену-массу.

Разработка условий получения пенообразователя проводилась с использованием сухой зерновой послеспиртовой барды, поскольку в ней содержится большее количество сырого протеина (около 27 мас. %) по сравнению с жидкой (около 2 мас. %) [12] и состав сухой барды более стабилен. Исходя из экономической целесообразности при гидролизе в качестве щелочного компонента использовали гидроксид кальция (известь). Кроме этого в силу малой растворимости извести в воде (0,17 г на 100 г воды при 20 °С) ее концентрация в растворе в ходе гидролиза бу-



дет поддерживаться постоянной. Небольшое количество извести, которое будет содержаться в полученном растворе гидролизата, при необходимости, можно легко удалить путем ее нейтрализации малым количеством минеральной кислоты.

В результате проведенных исследований установлены оптимальные соотношения компонентов и условия получения пенообразователя: вода: сухая барда: гидроксид кальция (по массе) – 100,0 : 15,0 : 2,5; продолжительность гидролиза 150–180 мин при температуре среды 93–95 °С. Содержание сухих веществ в полученном после фильтрования реакционной смеси растворе составило 8,4 %. Как известно, значительную роль в стабилизации пены белковых растворов играет рН среды. Так объем и стабильность пены достигают максимального значения в области рН, соответствующей изоэлектрическому состоянию белка. Экспериментально установлено, что высокие пенообразующие свойства раствора гидролизата достигаются при рН среды равным 6,5–7,0 ед. Минимальное значение концентрации раствора пенообразователя, при которой достигаются максимальная устойчивость пены (более 24 часов), минимальное водоотделение из пены (0 %) и хорошая кратность пены (15), оказалось равным 2,5 мас. % (рис. 1). Таким образом, для получения стабильной пенной структуры пенобетона необходимо придерживаться оптимальных условий использования гидролизата: рН – 8,5; концентрация сухих веществ в пенообразующем растворе – 2,5 %, содержание стабилизатора в растворе (сульфата железа (II)) – 0,3 %, время вспенивания – 3 мин.

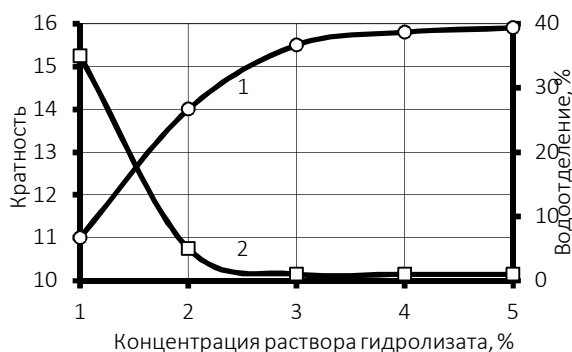


Рис.1. Зависимость кратности (1) и водоотделения из пены (2) от концентрации раствора пенообразователя

Помимо кратности и устойчивости, важным показателем строительной пены является ее совместимость с цементной системой, которая оценивается коэффициентом стойкости пены в растворяющей смеси. Испытания показали малую усадку цементной массы в присутствии щелочного гидролизата, а значение коэффициента стойкости пены составило 0,92.

При разработке составов пенобетонов применяли следующие материалы: портландцемент ЦЕМ I42,5 Б, выпускаемый ОАО «Мордовцемент»; наполнитель – тонкомолотый мел (известняковая мука с содержанием карбоната кальция 92 %, Атемарского месторождения Республики Мордовия), обладающий сравнительно легкой диспергируемостью в воде, особенно при интенсивном перемешивании суспензии, и образующего однородную пенобетонную массу.

Пенобетонную смесь готовили по двухстадийной технологии [13]. Отформованные образцы выдерживали в нормальных условиях в течение 28 суток, после чего проводили испытания. На рынке строительных материалов наиболее распространены пенобетоны плотностью 600 – 800 кг/м³, поэтому на начальном этапе исследований было выявлено влияние состава пенобетонной смеси и продолжительности перемешивания на прочность пенобетона с расчетной средней плотностью 700 кг/м³ с применением метода математического планирования эксперимента [14-15]. Была принята математическая модель в виде двухфакторного плана второго порядка, в качестве варьируемых факторов выбраны количество наполнителя и продолжительность перемешивания. Параметрами оптимизации были выбраны средняя плотность, прочность материала, осадка пеномассы. Для сравнения прочностных свойств пенобетонов различной плотности применялась такая характеристика как коэффициент конструктивного качества (ККК) [16].

Анализ полученных данных показал, что на ККК оба фактора оказывают значительное влияние. При снижении содержания наполнителя и увеличении времени перемешивания ККК возрастает (табл. 1). Анализ изменения средней плотности показывает, что возрастание значений обоих факторов приводит к увеличению плотности. Таким образом, получение пенобетона плотностью 700 кг/м³ с максимальным значением ККК (прочностью при сжатии 2,7 МПа) возможно при оптимальном соотношении цемента и мела 0,8:0,2и продолжительности перемешивания 3 мин.

Таблица 1 – Зависимость свойств пенобетона от количества наполнителя и продолжительности перемешивания растворной смеси

Свойства пенобетона	Факторы, влияющие на свойства пенобетона					
	Количество наполнителя, % от массы вяжущего			Продолжительность перемешивания растворной смеси, мин		
	20	25	30	2	3	4
Плотность	734	710	773	714	710	727
ККК	4,8	5,4	4,6	5,0	5,4	5,2



С учетом полученных результатов эксперимента произведен расчет состава для приготовления 1 м³ пенобетона плотностью 700 кг/м³ (табл. 2).

Таблица 2 – Состав и свойства пенобетона

Состав						Плотность, кг/м ³	Прочность при изгибе, МПа	Прочность при сжатии, МПа
Цемент, кг	Известняковая мука, кг	Вода, л	Пенообразователь					
			Гидролизат, л	Стабилизатор, л	Вода, л			
487	121	303	8,5	0,6	32,5	710	0,26	2,7

Физико-технические свойства пенобетонных образцов определяли в возрасте 28 суток после твердения в н. у. Было установлено, что пенобетоны плотностью 700 кг/м³, полученные на основе разработанного пенообразователя, по морозостойкости и теплопроводности удовлетворяют нормативным требованиям. Прочность образцов после 30 циклов попеременного замораживания и оттаивания снизилась на 2,8%. Важнейшей характеристикой пенобетона является деформация усадки. Снижение усадочных деформаций – это наиболее сложная задача совершенствования технологии пенобетона естественного твердения. Изучение деформации усадки в течение 90 суток показало, что наиболее интенсивно данный процесс происходит в течение первых 30 суток. Значение данного показателя для пенобетона плотностью 700 кг/м³ составило 1,4 мм/м.

Заключение. Результаты проведенных исследований показывают, что из вторичных продуктов производства этилового спирта путем их щелочного гидролиза, возможно получение эффективного и экологически безопасного пенообразователя строительного назначения. Применение разработанного пенообразователя способствует формированию стабильной пенной структуры пенобетона, и позволяет получать пенобетонные стеновые материалы с высокими физико-техническими показателями.

Библиографический список

1. Славчева Г.С., Чернышов Е.М., Новиков М.В. Теплоэффективные пенобетоны нового поколения для малоэтажного строительства // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 20–24.

2. Иванов И.А., Жмыхов В.М. Оценка свойств синтетических пенообразователей для пенобетона // Строительные материалы. 2007. № 7. С. 33–34.

3. Безбородов В.Г., Завадский В.Ф., Никулина Т.Ю. К вопросу об устойчивости минерализованных пен для получения материалов ячеистой структуры // Изв. вузов. Строительство. 2002. №12. С. 29–33.

4. Макшин Н.А., Кудяков А.И., Бартеньева Е.А. Неавтоклавный пенобетон, дисперсно-армированный минеральными и волокнистыми добавками // Изв. вузов. Строительство. 2018. №8. С. 58–68.

5. Черкасов В. Д., Бузулуков В. И., Емельянов А. И., Хазеев Х.И., Кротова В.С. Разработка пенобетонов на основе пенообразователя из продуктов микробного синтеза // Региональная архитектура и строительство. 2019. № 4 (41). С. 27–33.

6. Леонович С.Н., Свиридов Д.В., Беланович А.Л., Савенко В.П., Карпушенков С.А. Сухая смесь для получения жаростойкого пенобетона // Строительные материалы. 2017. № 7. С. 25–29.

7. Аубакирова И.У., Пухаренко Е.В. Формирование структуры фибропенобетона на макроуровне // Вестник гражданских инженеров. 2023. № 4 (99). С. 77–82.

8. Бартеньева, Е.А., Ильина Л.В., Себелев И.М. Формирование устойчивой пенной структуры в технологии пенобетона. // Изв. вузов. Строительство. 2024. № 10. – С. 87–98.

9. Моргун В.Н., Моргун Л.В., Гебру Б.К. О важности учета энергетического потенциала сырья при изготовлении пенобетонных смесей // Химия, физика и механика материалов. 2023. № 2 (37). С. 69–81.

10. Яровенко В.Л., Устинников Б.А., Богданов Ю. П., Громов С.И. Справочник по производству спирта. - М.: Легкая и пищевая промышленность, 1981. 336 с.

11. Чухрай Е.С., Атякшева Л.С., Филиппенко О.С. Особенности изотерм адсорбции белков на кремнеземных адсорбентах // Журн. физ. химии. 2011. Т. 85, №5. С. 979–986.

12. Кайшев А.Ш., Айрапетова А.Ю., Ушакова Л.С., Туховская Н.А., Кайшева Н.Ш. Изучение биологически активных веществ, содержащихся в отходах спиртового производства // Фармация. 2011. №7. С.7–10.

13. Завадский В.Ф. Технология изоляционных строительных материалов и изделий. Ч. I: Стеновые материалы и изделия. - М.: Академия, 2012. 189 с.

14. Красовский В.А., Филаретов Г.Ф. Планирование эксперимента. - Минск: Изд-во БГУ им. В.И. Ленина, 1982, 302 с.

15. Вознесенский В.А., Ляшенко Т.В., Огарков Б.Л. Методические указания по построению математических моделей. ОИСИ.- Одесса, 1982. 94 с.

16. Воробьев В.А., Комар А.Г. Строительные материалы. - М: Стройиздат, 1976, 475 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 29.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 29.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.

Научная статья

УДК 539.3 + 691.175.2

ГРНТИ: 67.09 Строительные материалы и изделия

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818_2025_4_118

ВЛИЯНИЕ НАПОЛНИТЕЛЕЙ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ БУТИЛКАУЧУКА

© Авторы 2025

SPIN: 3031-5601

ТАРАСОВА Ольга Ивановна

старший преподаватель кафедры Строительных конструкций и машин

Вятский государственный университет

(Россия, Киров, e-mail: tarasovaolga63@yandex.ru)

SPIN: 9507-0540

ЮРКИН Юрий Викторович

кандидат технических наук, заведующий кафедрой Строительных конструкций и машин

Вятский государственный университет

(Россия, Киров, e-mail: yurkin@vyatsu.ru)

SPIN: 6010-7921

АВДОНИН Валерий Викторович

кандидат технических наук, доцент кафедры Прикладной механики

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

имени Н.П. Огарева

(Россия, Саранск, e-mail: avdoninvalerii@bk.ru)

СТРОКИН Андрей Евгеньевич

аспирант, кафедра Прикладной механики

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

имени Н.П. Огарева

(Россия, Саранск)

ДАВТЯН Миша Арменович

аспирант, кафедра Прикладной механики

Национальный исследовательский Мордовский государственный университет

имени Н.П. Огарева

(Россия, Саранск)

Аннотация. В статье представлены результаты исследований влияния концентрации разного вида наполнителей на динамические механические свойства композиционных материалов на основе бутилкаучука (БК). Наполнители принимались в соотношении от 15% до 50% по объёму. Ведущими методами исследования являлись: 1. Сравнительный анализ температурно-частотных зависимостей тангенса угла механических потерь и модуля упругости, полученных методом DMA; 2. Испытания методом сканирующей электронной микроскопии. 3. Испытания методом ИК-спектроскопии, 4. Испытания на прочность связи с металлом при отслаивании. Установлено: 1. Для упрочнения композиций следует вводить наполнитель тех. углерод, либо смесь тех. углерод с мелом, а для получения материалов с высокими вибропоглощающими свойствами и низкой стоимостью следует принять наполнитель мел, как более дешёвый и легкий материал в количестве 50% по объёму. 2. С увеличением доли наполнителя мел – химического взаимодействия между ним и полимером не происходит, так как в молекулах протекают процессы, не приводящие к образованию или разрыву химических связей. Аналогичные результаты были получены для всех четырёх принятых к испытаниям наполнителей. Материалы статьи представляют практическую ценность для разработки новых композиционных демпфирующих материалов.

Ключевые слова: модуль упругости; тангенс угла механических потерь; температура стеклования; бутилкаучук; промышленное масло; наполнители: мел, каолин, технический углерод, барит

Для цитирования: Влияние наполнителей на динамические механические свойства композиционных материалов на основе бутилкаучука / О.И. Тарасова, Ю.В. Юркин, В.В. Авдониин, А.Е. Строкин, М.А. Давтян // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 118-129. doi:10.51608/26867818_2025_4_118.



Original article

INFLUENCE OF FILLERS ON DYNAMIC MECHANICAL PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS
BASED ON BUTYL RUBBER

© The authors 2025

TARASOVA Olga Ivanovna

*Senior lecturer at the Department of Building Structures and Machinery
Vyatka State University
(Russia, Kirov, e-mail: tarasovaolga63@yandex.ru)*

YURKIN Yuri Viktorovich

*Candidate of Technical Sciences
Head of the Department of Construction Structures and Machines,
Vyatka State University (Russia, Kirov, e-mail: yurkin@vyatsu.ru)*

AVDONIN Valeriy Viktorovich

*Candidate of Technical Science
Associate Professor at the Department of Applied Mechanics
National Research Mordovian Ogarev State University
(Russia, Saransk, e-mail: avdoninvalerii@bk.ru)*

STROKIN Andrey Evgen'evich

*Postgraduate student
National Research Mordovian Ogarev State University
(Russia, Saransk)*

DAVTYAN Misha Armenovich

*Postgraduate student
National Research Mordovian Ogarev State University
(Russia, Saransk)*

Abstract. The article presents the results of studies of the influence of the concentration of different types of fillers on the dynamic mechanical properties of composites based on butyl rubber. Fillers were taken in a ratio of 15% to 50% by volume. The leading research methods were: 1. Comparative analysis of the temperature-frequency dependences of the tangent of the mechanical loss angle and the modulus of elasticity, obtained by the DMA method; 2. The developed compositions of the composite material were tested by the infrared Fourier transform method. It has been established that to strengthen the compositions, the filler of technical specifications or a mixture of technical specifications with chalk should be introduced, and in order to obtain materials with high vibration-absorbing properties and low cost, chalk filler should be taken as a cheaper and lighter material in an amount of 50% per volumemu. And it was also found that with an increase in the proportion of the filler chalk, there is no chemical interaction between it and the polymer, since processes occur in the molecules that lead to the formation or rupture of chemical bonds. Similar results were obtained for all four fillers accepted for testing. The materials of the article are of practical value for the development of new composite damping materials.

Keywords: modulus of elasticity, mechanical loss tangent, glass transition temperature, butyl rubber, industrial oil, fillers: chalk, kaolin, tech. carbon, barite

For citation: Influence of fillers on dynamic mechanical properties of composite materials based on butyl rubber / O.I. Tarasova, Yu.V. Yurkin, V.V. Avdonin, A.E. Strokin, M.A. Davtyan // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 118-129. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_118.

Введение. Полимеры достаточно давно завоевали своё место в строительной отрасли. Без них уже не обходится практически ни один значимый проект. Одним из современных направлений в изготовлении новых материалов выступает производство композиционных материалов на основе полимеров, армированных разнообразными наполните-

лями и пластификаторами. В связи с тем, что полимерные композиционные материалы обладают большим набором ценных конструкционных и изоляционных свойств, они нашли широкое применение в строительстве и других областях. Наряду с бетоном, древесиной, металлом, стеклом они используются в процессе возведения и отделки зданий и



сооружений. Иногда просто заменяют собой традиционные строительные материалы, а иногда, проявляя уникальные свойства синтезированных композиций, становятся незаменимыми [1].

Современное строительство немыслимо без обеспечения комфортных условий проживания и эксплуатации зданий. Одним из ключевых факторов, влияющих на качество среды обитания, является виброакустическая безопасность. В этой связи возрастает значение вибропоглощающих материалов, которые позволяют эффективно снижать уровень вибраций и шумов, передающихся через строительные конструкции [2]. Современный рынок предлагает широкий спектр решений для виброзащиты. Действие применяемых в строительной отрасли различных видов вибропоглощающих композиционных материалов (таких как: вибродемпфирующие пластины, поглощающие вибрацию и снижающие звуковые и ударные шумы, от разного оборудования и механизмов на элементы строительных конструкций, они используются в кинозалах или звукозаписывающих студиях, для защиты от акустических вибраций; напольные покрытия – служащие для защиты основания пола, для придания эстетического вида помещению, для повышения комфорта и улучшения звукоизоляции и теплоизоляции; вибропоглощающие покрытия используемые для элементов конструкций системы вентиляции и кондиционирования воздуха в административных помещениях, что позволяет нивелировать нежелательное дребезжание несбалансированных элементов системы и снизить уровень шума; мембранно-вязкоупругие материалы, применяемые в перекрытиях и стенах, часто в виде слоистых систем; полиуретановые и каучуковые подложки, используемые под тяжёлые машины в фундаментах и опорах; различные типы специальных демпфирующих материалов и конструкций, предназначенных для снижения воздействия землетрясений на здания и сооружения в сейсмических регионах. Они поглощают или рассеивают энергию сейсмических колебаний, уменьшая разрушительные последствия; комбинированные сэндвич-панели, применяемые при возведении фасадов, перегородок и другие материалы) - направлено на снижение амплитуды колебаний вибрирующих поверхностей за счёт замены жесткой связи между вибрирующим элементом и основной конструкцией на упругую.

Вибропоглощение заключается в снижении вибрации и шума за счёт активных потерь или превращения колебательной энергии в другие её виды. Мерой поглощения вибрации является величина тангенс угла механических потерь ($\text{tg}\delta$) — это характеристика отставания деформации от напряжения.

Композиционные вибропоглощающие материалы должны гарантированно иметь значение тангенс угла механических потерь при демпфировании

($\text{tg}\delta$ более 0,3) в широком диапазоне рабочих температур [3-5]. Создание таких материалов с улучшенными свойствами, производимых по ресурсосберегающим технологиям, внедрённых и используемых в процессе строительства и эксплуатации зданий и сооружений, является одним из наиболее перспективных направлений в техническом материаловедении.

Одними из наиболее эффективных материалов с вибропоглощающими свойствами являются полимерные композиционные материалы, благодаря особенностям своей молекулярной структуры [6-7].

В качестве полимерной основы для композиционных материалов в основном могут быть использованы такие эластомеры, как бутилкаучук (БК), этиленпропиленовый каучук, хлорированный бутилкаучук различного молекулярного веса [8-11], полиэтилен [12], поливинилхлорид [13], латексные композиции [14], стирол-бутадиеновый каучук [15], этиленвинилацетат [16-18], поли-бутен [19]. Экспериментальные исследования и вибрационные тесты [20] при испытаниях натурального каучука и бутадиеннитрильного каучука - показали, что натуральный бутилкаучук продемонстрировал лучшую демпфирующую способность в условиях высоких температур.

С точки зрения практического применения в качестве составного вяжущего для вибропоглощающего материала, эффективного в широком температурно-частотном диапазоне, бутилкаучук является наиболее перспективным, как полимер, обладающий высокими диссипативными свойствами в диапазоне температур от 0 до плюс 40 °C, $\text{tg}\delta \geq 1,4$ [21].

В состав полимерной композиции наряду с полимером могут входить наполнители, отвердители, пластификаторы, мягчители, стабилизаторы, красители и другие составляющие. Эти отдельные компоненты существенно отличаются по свойствам, но кардинально влияют на свойства полимера. Введение в полимер наполнителей ведёт к повышению механической прочности композиционного полимерного материала, к увеличению динамического модуля упругости, к снижению его себестоимости и приданию ему специальных свойств. В качестве дисперсных наполнителей выступают порошкообразные вещества с различным размером частиц от 2 до 300 мкм. Содержание их в полимере меняется в широких пределах – от нескольких процентов до 70-80% по массе [22]. Наиболее распространёнными дисперсными минеральными наполнителями являются: карбонат кальция, каолин, тальк, тех. углерод, диоксид кремния, кварцевая мука, диатомит, аэросил и другие [23-26; 30]. Недорогая зола (отходы производства) была заполнена модифицированной эпоксидной смолой [27]. При выборе наполнителя учитывают способность его совместной работы с вяжущим, а также отсутствие склонности к агломерации частиц. Одним из наиболее дешёвых видов дис-



персных добавок является тонкоизмельчённый карбонат кальция [28-29].

Теоретической предпосылкой изучения влияния наполнителей на свойства полимерных композитов является полиструктурная теория [31-36], согласно которой при введении наполнителя происходит изменение надмолекулярной структуры (модифицируется структурная активность) полимера, наблюдается адсорбционное поглощающее взаимодействие (полимер/наполнитель) в результате которого ограничивается подвижность макромолекул, изменяется плотность упаковки полимерных цепей, их конформация (*пространственное расположение*) и ориентация вблизи твёрдой поверхности. При сближении отдельных частиц полимера и наполнителя их граничные слои начинают взаимодействовать между собой, появляются межмолекулярные связи: диполь – дипольное взаимодействие, водородные связи, химическое взаимодействие. При контакте появляются межмолекулярные силы сцепления, которые эквивалентны работе адгезии (W_a – *работа, затраченная на преодоление сил сцепления между молекулами разных фаз*), которая определяется по общеизвестному уравнению Дюпре, отражающее закон сохранения энергии при адгезии. Из него следует, что работа адгезии (W_a) тем больше, чем больше поверхностные натяжения исходных компонентов и чем меньше удельная свободная поверхностная энергия на границе фаз (γ_{12}).

$$W_a = \gamma_1 + \gamma_2 - \gamma_{12} \quad (1)$$

Известно, что причиной адгезии является молекулярное притяжение контактирующих фаз или их химическое взаимодействие, γ_{12} на границе фаз определяется по формуле Оуэна-Вендта:

$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - W_a$$
$$\gamma_{12} = \gamma_1 + \gamma_2 - 2(\gamma_1^d \gamma_2^d)^{0,5} - 2(\gamma_1^p \gamma_2^p)^{0,5} \quad (2)$$

С повышением степени наполнения на поверхности наполнителей образуются пространственные полимеры в виде плёнки, так как происходит процесс кластерообразования, при котором отдельные частицы в композиционной смеси сближаются, образуя в зазорах между частицами плёночную структуру матрицы, что в свою очередь приводит к изменению механических динамических характеристик композита (к увеличению прочности и модуля упругости с уменьшением температуры). В то же время, если наполнитель имеет на поверхности малое количество функциональных (гидроксильных) групп, то усиливающее действие его невелико.

Литературный обзор показал, что проблема снижения мощности источника звука и вибрации требует от специалистов разработки новых, а также доработки уже существующих эффективных материалов, способных как частично снизить, так и полностью устранить вибрационные воздействия. [37, 38, 39, 40]. Возникает необходимость эксперимен-

тально исследовать влияние разного рода наполнителей на динамические механические свойства бутылкачука.

Цели и задачи. Цель работы – выявить оптимальный наполнитель, который бы удовлетворял всем заданным свойствам демпфирующего материала. С учётом этой цели решались задачи: провести анализ влияния наполнителей (мел, каолин, барит, тех. углерод) на динамические механические свойства эластомера-бутылкачука и выявить морфологию смесей, возникающую при взаимодействии между БК и частицами наполнителя, и как полученная структура влияет на механические динамические характеристики композиционного материала в зависимости от вида и концентрации наполнителя.

Материалы и методы. *Материалы.* В качестве наполнителей применялись следующие материалы: мел марки КМ-1 (ОАО «Стройматериалы», РФ), ТУ 5743-001-54653514-05, каолин марки КР-1 (Новокаолиновый горно-обогатительный комбинат, РФ), ГОСТ 79503-84, микробарит марки КБ-1 (ООО Sibelco Рус, РФ) ГОСТ 4682-84, технический углерод марки П-803 (Нижнекамсктехуглерод, РФ) ГОСТ 7885-86. В качестве полимерного связующего применили бутылкачук (БК) марки БК-1675Н (ООО ПКФ «Арсенал Кама», РФ). В качестве пластификатора применили индустриальное масло (МИ) марки И-40 ГОСТ 20799-880, (Роснефть), в соотношении БК/МИ 60/40% по объёму. Содержание наполнителей в композитах составляло 15%, 30%, 40%, 50% по объёму. Смешение проводилось на лабораторном смесителе периодического действия с Z-образными роторами. Температура смешения составляла 70°C, время – 1 час. Маркировка и соотношение компонентов приведены в таблице 1.

Методы: 1. Для определения динамических механических свойств образцов использовали стандартную методику ASTM D4065-12 с применением анализатора Netzsch DMA242 (Германия). Образцы диаметром 5мм подвергали колебательным деформациям. Модуль упругости (E') и тангенс угла механических потерь ($\tan \delta$) определяли при изменении температуры образцов от минус 80°C до плюс 40°C при скорости нагревания 2°/мин, при изменении частоты колебаний от 1 до 100 Гц.

2. Для получения наглядной информации о строении смеси при анализе её состава (морфологию наполненных смесей) исследовали сканирующим электронным микроскопом (JSM-6510LV), получая изображения в виде картин высокого разрешения.

3. Для регистрации спектров, содержащих полосы поглощения, специфичные для химических веществ в матрице образца полимера использовали метод ИК-спектроскопии, при температуре окружающей среды от 18 до 25°C.



Таблица 1 – Маркировка и соотношение структурообразующих компонентов

Марка состава	Тип наполнителя	Объёмное содержание, %		
		бутил-каучук	индустриальное масло	наполнитель
БМ4	-	60	40	0
БМ4М15	мел	51	34	15
БМ4М30	мел	42	28	30
БМ4М40	мел	36	24	40
БМ4М50	мел	30	20	50
БМ4К15	каолин	51	34	15
БМ4К30	каолин	42	28	30
БМ4К40	каолин	36	24	40
БМ4К50	каолин	30	20	50
БМ4Б15	барит	51	34	15
БМ4Б30	барит	42	28	30
БМ4Б40	барит	36	24	40
БМ4Б50	барит	30	20	50
БМ4Т15	тех. углерод	51	34	15
БМ4Т30	тех. углерод	42	28	30
БМ4Т40	тех. углерод	36	24	40
БМ4Т50	тех. углерод	30	20	50

Истинная плотность материалов: БК – 0,931 г/см³; МИ – 0,9 г/см³; мел – 2,45 г/см³; каолин – 2,06 г/см³; микробарит – 4,12 г/см³; ТУ – 1,7 г/см³.

4. Прочность связи с металлом при отслаивании образцов композитов оценивали при комнатной температуре с помощью разрывной машины фирмы «Shimadzu» согласно ГОСТ 21981-76.

2. Основная часть

2.1 Сравнительный анализ температурно-частотных зависимостей тангенса угла механических потерь и модуля упругости, полученных методом DMA. На диаграммах (рис. 1, 2, 3, 4) приведены результаты исследований по измерениям модуля упругости (E') и тангенса угла механических потерь ($\tan \delta$) при введении в полимер, пластифицированный индустриальным маслом (БМ4), наполнителей: инертные – мел и барит, активный – технический углерод, полуактивный – каолин, с объёмным содержанием от 15-до 40% при частоте 10 Гц.

При увеличении концентрации наполнителя (рис. 3) тех. углерода свыше 30% по объёму наблюдается снижение значения E' (соответственно прочности образца), связанное с агломерацией частиц, так как количество связанного полимера растёт, соответственно падает прочность.

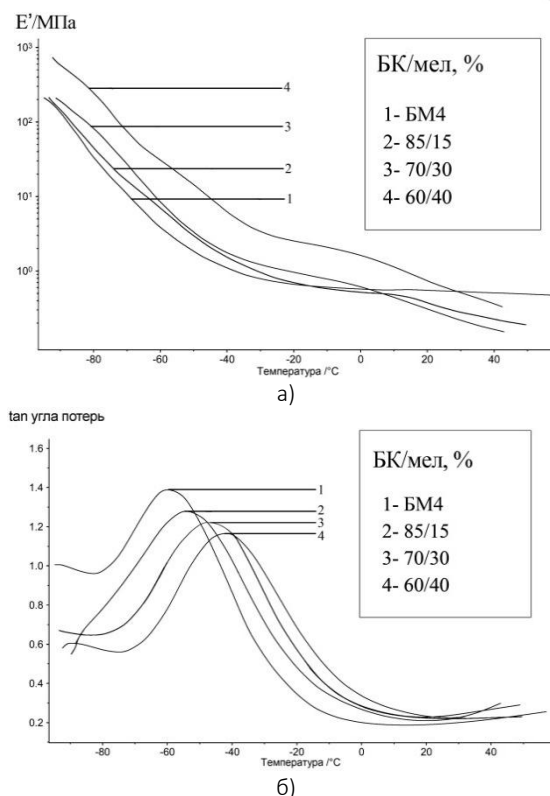


Рисунок 1 – Температурная зависимость: (а) – E' , (б) – $\tan \delta$ для составов с объёмным содержанием мела от 15 до 40%

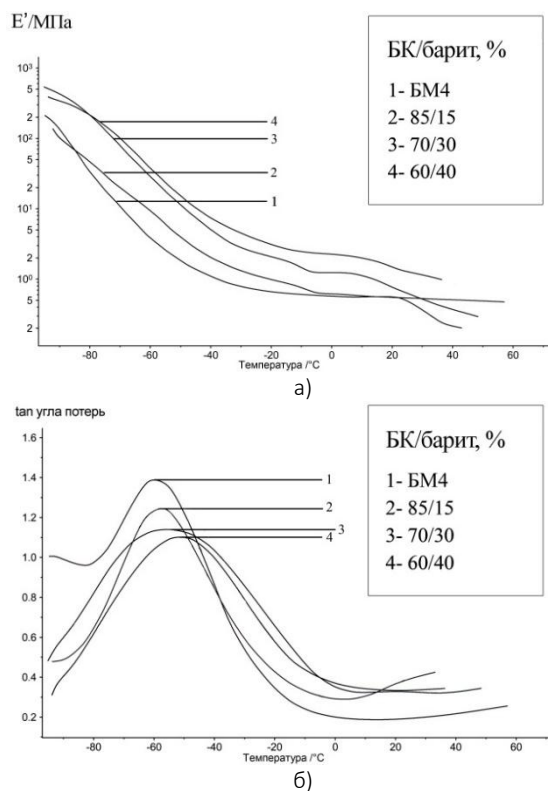


Рисунок 2 – Температурная зависимость: (а) – E' , (б) – $\tan \delta$ для составов с объёмным содержанием барита от 15 до 40%

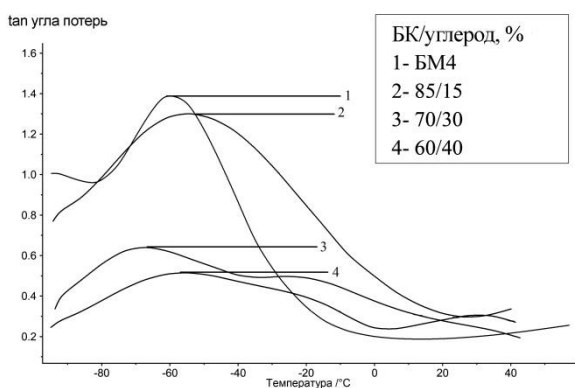
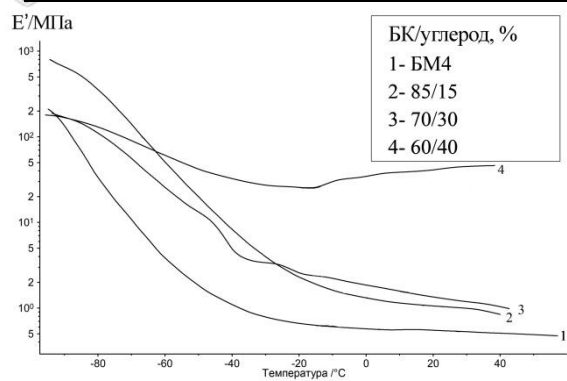


Рисунок 3 – Температурная зависимость:
(а) – E' , (б) – $\tan \delta$ для составов с объёмным содержанием
технического углерода от 15 до 40%

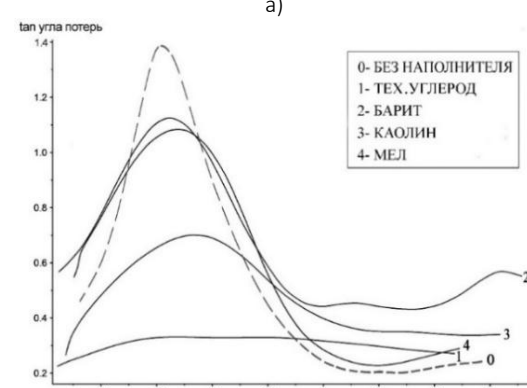
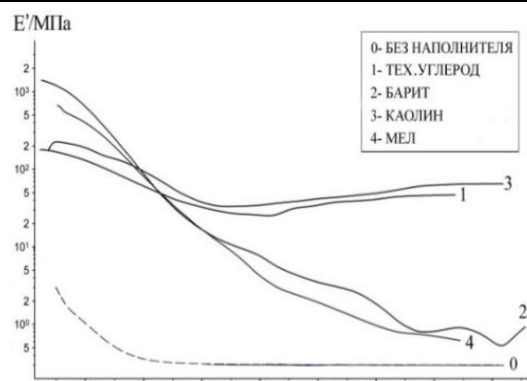


Рисунок 5 – Температурная зависимость:
(а) – E' , (б) – $\tan \delta$ при частоте 10 Гц, для составов
с объёмным содержанием наполнителей 50%

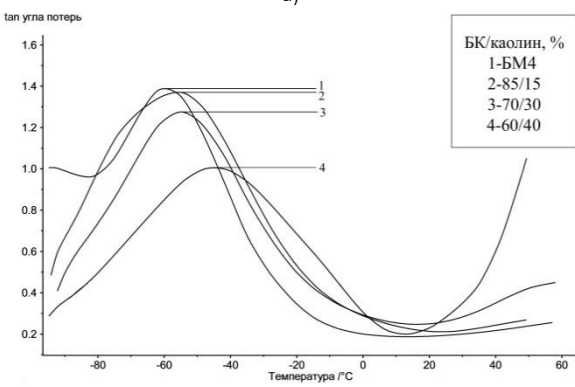
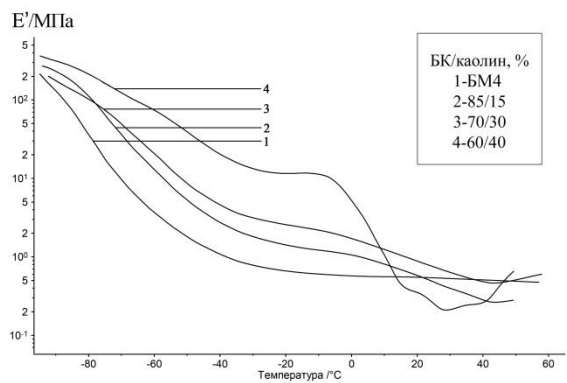


Рисунок 4 – Температурная зависимость:
(а) – E' , (б) – $\tan \delta$ для составов с объёмным содержанием
каолина от 15 до 40%

На совмещённой диаграмме при 50 % наполнении (рис. 5) наблюдается, что E' при +20°C тех. углерода и каолина выше, чем мела и барита, и тех. углерод имеет самое низкое значение пика $\tan \delta$. Полуактивный наполнитель каолин имеет среднее значение $\tan \delta_{\max}$, но высокие значения E' . Инертные – мел и барит имеют самые высокие значения $\tan \delta$ в области отрицательных температур. Полученные экспериментальные значения сведены в таблицу 2.

Таблица 2 – Максимальные значения E' и $\tan \delta$ при 50% концентрации наполнителя в составе полимерной смеси

Показатель	Соотношение БК/пластификатор			
	тех. углерод	барит	каолин	мел
E' (МПа)/при температуре $\tan \delta$ максимальном, °C	30/-20	50/-55	51/-45	35/-4909
E' (МПа)/ при +20 °C	45 / +20	3 / +20°C	50 / +20°C	1 / +20
$\tan \delta_{\max}$ / температура, °C	0,33/от – 70до+40	1,15/- 55	0,7/-45	1,1/- 49

На основе экспериментальных данных были построены графики зависимости. Тс и $\tan \delta_{\max}$ от вида и концентрации наполнителей (рис. 6).

Сравнивая их значения установлено, что при увеличении доли наполнения от 0% до 50%, по всем типам наполнителей происходит снижение демпфирующих свойств, а температура стеклования (T_g) за-



кономерно, почти линейно, увеличивается: с тех. углеродом на 40°, с каолином - на 15°, с мелом - на 11°, с баритом на 5°.

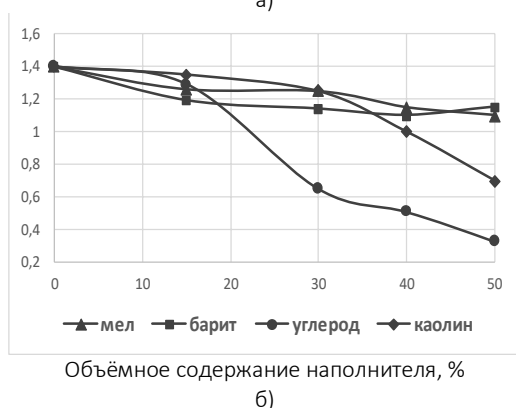
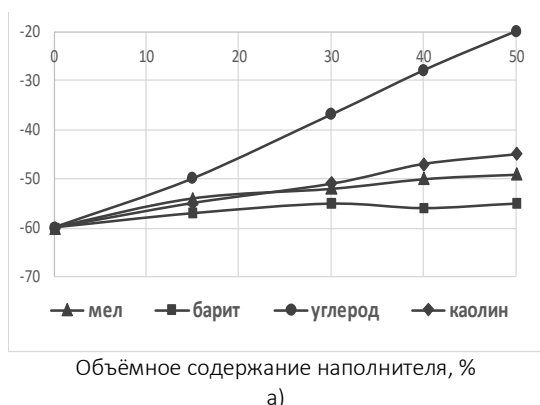


Рисунок 6 – Изменение: (а) – Тс, (б) – пика tgδ; по наполнителю (мел, барит, тех. углерод, каолин) при изменении их концентрации от 0 до 50%.

2.2 Испытания методом сканирующей электронной микроскопии. Для систем с наполнителем важным фактором является количество наполнителя в полимере, его удельная поверхность, размер частиц, состояние и морфология поверхности частиц. На микрофотографиях оценивалась микроструктура композита с наполнением 15%, 30%, 40% мелом (рис. 7) и тех. углеродом (рис. 8.)

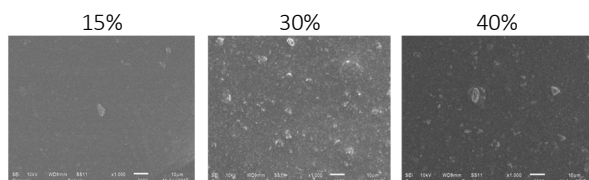


Рисунок 7 – Изображения наполненных мелом композитов на основе бутилкаучука

Выявлена хорошая дисперсия мела (рис. 7), с увеличением доли наполнителя наблюдается образование агломератов, при 30% процентном наполнении их количество увеличивается, а при 40% процентном содержании наблюдается увеличение размеров самих агломератов.

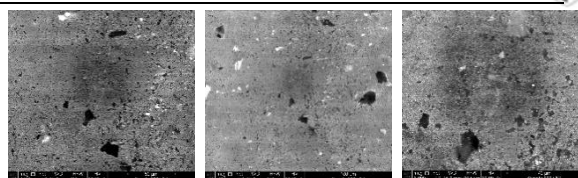


Рисунок 8 – Изображения наполненных ТУ композитов на основе бутилкаучука

В отличие от мела, тех. углерод (рис. 8), обладает большой удельной адсорбционной поверхностью, но малым размером частиц, которые состоят из отдельных небольших кристаллических ячеек, построенных по типу графита. Расположение углеродных атомов в слое такое же, как и в кристаллах графита, а расстояние между слоями больше. Места выхода торцов параллельных слоев на поверхность частиц обладают повышенной энергией и, следовательно, большей адсорбционной способностью.

Важно, установить взаимосвязь между эффектом усиления бутилкаучука наполнителем и адгезией полимера к частицам наполнителя. При этом необходимо учитывать их состав и структуру, а также наличие функциональных групп.

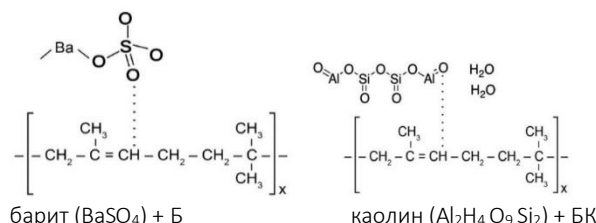
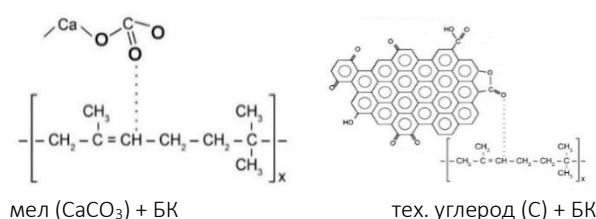


Рисунок 9 – Структурные фрагменты. Схематическое изображение взаимодействия молекул разного вида наполнителей и функциональных групп макромолекулы бутилкаучука в процессе структурирования смеси

При рассмотрении структурных формул взаимодействующих материалов (рис. 9) было отмечено, что они характеризуются наличием активных групп на поверхности частиц. За счёт высокой электроотрицательной кислорода происходит сближение отдельных частиц наполнителя и полимера. На рисунке 6 точками показаны образовавшиеся межмолекулярные связи между функциональными группами наполнителя и макромолекулой бутилкаучука. В связи с этим большую роль играет наличие их реакционная активность на границе раздела фаз.

С точки зрения химии основное значение поверхности частиц наполнителя – это их свободная



поверхностная энергия (поверхностное натяжение), величина, которая определяет адгезионное взаимодействие.

При этом чем больше силы взаимодействия, тем больше поверхностное (межфазное) натяжение.

На основании известных характеристик (таблица 3) были вычислены значения свободной поверхностной энергии (γ) согласно формуле Оуэна-Вендта.

Таблица 3 – Составляющие удельной поверхности энергии. Расчётное значение работы адгезии бутылкаучука к различным видам наполнителей

Компоненты	Параметры			
	γ_d , Дж/м ²	γ_p , Дж/м ²	γ_s , Дж/м ²	Wадг, Дж/м ²
бутылкаучук	50	5	55	-
мел	27,7	31,3	59	(БК+мел) 62,24
каолин	67,6	103,4	171	(БК+каолин) 103,62
тех. углерод	51	4	55	(БК+тех.углер.) 110
барит	Данные в источниках не обнаружены			-

Работа адгезии (W_a) рассчитана с учётом составляющих компонентов энергии поверхностей:

γ_d – дисперсионная составляющая удельной поверхностной энергии.

γ_p – полярная составляющая удельной поверхностной энергии.

γ – суммарная удельная поверхностная энергия межфазных границ

Преобразование уравнения (1) даёт возможность расчёта работы адгезии по формуле (3):

$$W_a = 2 [(\gamma \gamma_1^d \gamma_2^d) + (\gamma \gamma_1^p \gamma_2^p)] \quad (3)$$

Таблица 4 – Характеристики наполнителей

Наполнитель	Удельная поверхность наполнителя, см ² /г	Диаметр частиц наполнителя (d), мкм	Толщина граничного слоя композита (δ), мкм [41]	Активность наполнителя (α)
мел тех.нич.	11019	2,3	≈ 0,7	3,163
каолин	11561	2,2	≈ 0,7	3,382
барит	7344	2,0	≈ 0,7	3,913
тех. углерод	46500	0,9	≈ 0,7	15,691

Измерение удельной поверхности наполнителей и диаметр его частиц проводили Белгородским государственным технологическим университетом имени В.Г. Шухова с помощью прибора ПСХ-12, методом газопроницаемости Козени и Кармана от 11 июля 2018 года.

Работа адгезии в системе полимер-наполнитель тем больше, чем активнее наполнитель (табл. 3). Адгезия мела к БК очень низкая, лучшими

показателями адгезии обладают каолин и тех. углерод.

Рассмотрим связь удельной поверхности различного рода наполнителей с диаметром частиц наполнителя (таб. 4).

Активность наполнителей зависит от их природы. Известно, что чем меньше размер частиц, тем больше удельная поверхность наполнителя. Величина поверхностного натяжения на границе двух фаз определяется межмолекулярным взаимодействием (происходит самопроизвольный процесс адгезии) этих фаз. Наполнитель должен обладать хорошей адгезией к связующему [42]. Увеличение площади контакта между полимером и наполнителем приводит к повышению активности наполнителя и к повышению адгезии.

Если толщина межфазного слоя композита (δ) напрямую связана с активностью наполнителя и с диаметром частиц наполнителя (d), то мера активности наполнителя (α) – коэффициент, выражающий отношение объема связанного полимера к объему наполнителя, определяется выражением: [43]

$$\alpha = (1 + \frac{2\delta}{a})^3 - 1 \quad (4)$$

Для расчёта, толщину граничного слоя композита (δ) условно приняли равной 0,7 мкм [41]. Используя формулу (4) была найдена активность испытуемых наполнителей, сравнивая полученные значения (табл. 3) можно утверждать, что тех. углерод имеет наименьший диаметр частиц, но наибольшую удельную поверхность, и наибольшую активность (на порядок выше относительно других представленных наполнителей), что не противоречит существующим фактам [44]. Мел имеет наибольший диаметр частиц, но наименьшую удельную поверхность, и соответственно – наименьшую активность. У каолина активность немного больше, чем у мела, а активность барита с уменьшением удельной поверхности относительно мела и каолина – увеличивается. Полуактивный каолин и инертные – мел и барит обладают почти в 5 раз меньшей активностью относительно ТУ. Наибольшую активность тех. углерода можно объяснить тем, что его значительная удельная поверхность даёт большую поверхность соприкосновения его с бутылкаучуком.

С увеличением доли наполнителя количество прочных связей увеличивается. Большое число связей уменьшает подвижность макромолекул в граничном слое, при этом образуются донорно-акцепторные (интерпретируемые как водородные) связи, что соответствует увеличению модуля упругости (см. рис. 1,2,3,4) по всем испытанным смесям с наполнителями.

2.3 Испытания методом ИК-спектроскопии.

Для определения природы связей между наполнителем и бутылкаучуком производились исследования на наполненных образцах с разной концентрацией



(0%, 30%, 40%, 50 % по объёму) мела и ТУ с использованием прибора спектрального анализа. По инертному наполнителю мел (рис. 10) было установлено, что с увеличением доли наполнителя мел химического взаимодействия между мелом и полимером не происходит, на том основании, что новых пиков, которые могли бы соответствовать новым функциональным группам не обнаружено, в молекулах происходят процессы, не приводящие к образованию или разрыву химических связей.

взаимодействия (Ван-дер-Ваальсова связь), возникающими между молекулами (при отсутствии постоянных диполей). Притяжение между ними появляется в результате нахождения движущихся частиц в какой-то момент времени близко друг от друга в однородной среде (электронная плотность стала выше в одном месте), в этот момент образовался мгновенный диполь, который оказывая влияние на соседнюю молекулу образует индуцированный (постоянный) диполь, в результате чего появляются силы притяжения.

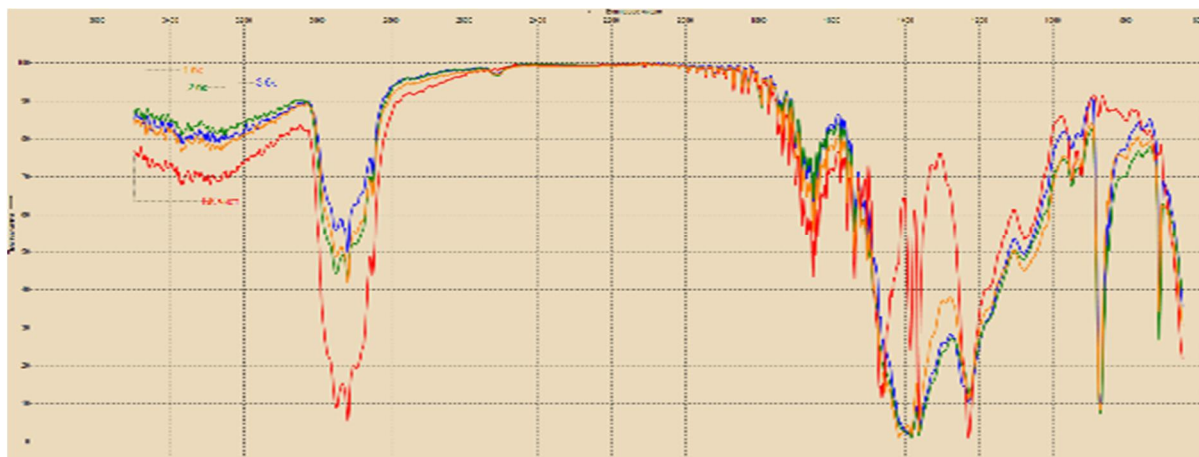


Рисунок 10 – Инфракрасный спектр смесей с мелом, составы: 100/0 – красный; 70/30 – оранжевый; 60/40 – зелёный; 50/50 – синий

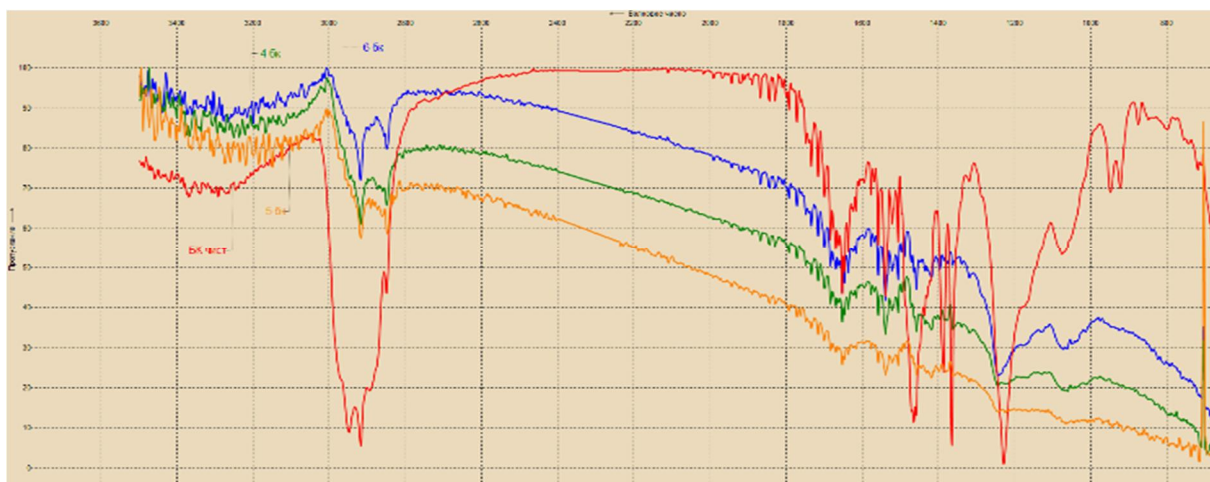


Рисунок 11 – Инфракрасный спектр смесей с тех. углеродом, составы: 100/0 – красный; 70/30 – зелёный; 60/40 – оранжевый; 50/50 – синий

При исследовании смеси с активным ТУ (рис. 11) наблюдается синхронное отставание полос относительно чистого БК, на том основании, что отмечается более интенсивное поглощение ИК излучение ТУ из-за строения самого наполнителя (связь углерод-углерод). Это связано с постепенным увеличением количества ТУ в композициях, поэтому можно смело утверждать, что обнаружены только физические взаимодействия функциональных групп БК.

Такое взаимодействие можно ассоциировать с силами межмолекулярного слабого дисперсионного

2.4 Испытания на прочность связи с металлом при отслаивании. Помимо динамических свойств, использовались испытания механических свойств. На рисунке 12 приведены экспериментальные результаты изменения адгезионной прочности образцов в зависимости от объемного содержания мела и тех. углерода – 15%, 30%, 40%, 50%. Максимальное значение прочности наблюдается у композиции при 30% наполнении тех углеродом – 14,9 Н/см, к 40 % составу происходит снижение прочности до 9,5 Н/см, к 50% составу образец полностью теряет свойства



связи с металлом (адгезия отсутствует). Смесь с наполнителем мел ведёт себя иначе: на диапазоне от 15% до 40% содержания мела по объёму - прочность монотонно увеличивается от 7 Н/см до значения 8,9 Н/см, а к 50% составу происходит незначительное снижение прочности до значения 7,5 Н/см (что не менее 6 Н/см). Все смеси показывают когезионную прочность, кроме смеси с ТУ при 50% наполнении.

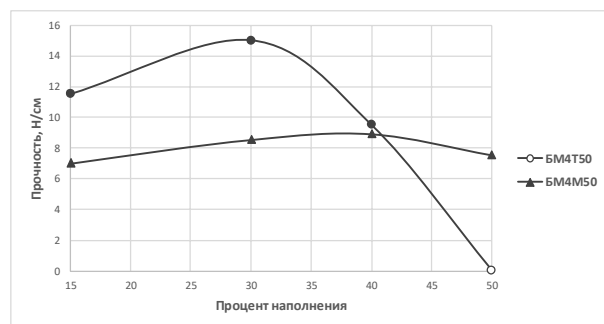


Рисунок 12 – Изменение прочности связи с металлом при отслаивании композиционного материала в зависимости от объемного содержания мела и тех. углерода – 15% 30%, 40%, 50%

С увеличением доли наполнителей до 30 % прочность композиций увеличивается за счёт высокой адсорбционной способности (количество точек контакта тех. углерода и мела с поверхностью полимера БК увеличивается), возникает упорядоченный, частично ориентированный межфазный слой полимера с повышенной прочностью. Введение инертного наполнителя мел от 30% до 40% по объёму приводит к большему повышению прочности композиций, чем введение таких же количеств активного наполнителя тех. углерода, что связано с разницей в их дисперсном состав, прочностные качества ТУ снижаются в результате образования плёночной структуры матрицы. Образцы с мелом такие изменения показывают при 50 процентном наполнении, что в свою очередь приводит к изменению механических характеристик.

Выводы. В результате исследований было установлено, что добавление различных наполнителей, таких как мел, каолин, технический углерод и барит, в бутылкаучук (БК) существенно изменяет его динамические механические свойства. Увеличение концентрации наполнителя от 15% до 50% по объёму приводит к снижению демпфирующих характеристик ($\text{tg}\delta$) и увеличению модуля упругости (E').

Наибольшее упрочнение композиций достигается при использовании технического углерода или его смеси с мелом. Однако для создания вибропоглощающих материалов с оптимальным сочетанием стоимости и эффективности наиболее подходя-

щим наполнителем оказался мел, с более оптимальной концентрацией 50% по объёму.

Температура стеклования (T_g) композитов линейно возрастает с увеличением содержания наполнителя. Наибольший прирост T_g наблюдается у технического углерода (40°C), тогда как у мела и барита изменения менее выражены (11°C и 5°C соответственно).

Анализ взаимодействия между наполнителями и полимером показал отсутствие химических реакций. Вместо этого преобладают слабые дисперсионные связи (Ван-дер-Ваальсовы взаимодействия), что подтверждено методами ИК-спектроскопии и электронной микроскопии.

Адгезионные свойства композитов зависят от типа наполнителя. Технический углерод и каолин демонстрируют наилучшую адгезию к БК. Прочность связи с металлом достигает максимума при 30% содержании технического углерода (14,9 Н/см), но резко падает при 50%. В то же время композиции с мелом сохраняют стабильную прочность даже при высокой концентрации наполнителя.

Полученные результаты имеют практическое значение для разработки композиционных материалов с заданными демпфирующими и прочностными характеристиками. Для создания вибропоглощающих материалов рекомендуется использовать мел в концентрации 50%, а для усиленных композиций — технический углерод или его комбинации с другими наполнителями.

В целом, работа вносит значительный вклад в понимание влияния наполнителей на свойства полимерных композитов и предоставляет ценные рекомендации для их применения в строительстве и промышленности.

Библиографический список

1. Кербер М.Л. Полимерные композиционные материалы: структура, свойства, технология (издание 6-е, исправленное и дополненное), перевод под ред. академика А.А. Берлина. 2023. 712 с.
2. Кордюкова, А. П. Перспективные направления развития полимерных связующих и полимерных композиционных материалов на их основе / А. П. Кордюкова. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2022. — № 30 (425). — С. 1-4. — URL: <https://moluch.ru/archive/425/94165/>.
3. Chen B., Dai J., Song T., Guan Q. Research and Development of High-Performance High-Damping Rubber Materials for High-Damping Rubber Isolation Bearings // A Review. Polymers. — 2022. — No.14(12). — pp. 24-27. doi:org/10.3390/polym14122427
4. Yak, S., Klempner D., Frisch K. Advances in Interpenetrating Polymer Networks // Klempner, D., Frisch, K.C., Eds.; Technomic Publishing Company. — 1994. — Vol. IV: Lancaster, PA. USA.
5. Wei X.L., Huang, Q.D., Gong, G.B., Zhang, H.Q., Xu, D.H., Zhu, J., Liang, T., Li, J. Research progress of butyl rubber



and halobutyl rubber damping materials // China Synth. Rubber Ind. 2021. – No.44. – pp. 145-149.

6. Лебедева О.В., Сипкина Е.И. Полимерные композиты и их свойства // Известия вузов прикладная химия и биотехнология. – 2022. – Т.12. № 2. – С.192 – 207. doi: 10.21285/2227-2925-2022-12-2-192-207

7. Cherkasov V.D., Yurkin Yu.V., Avdonin V.V. Study of Physical and Mechanical Properties of Non-Polar Rubber-Based Sealants Depending on Filler Type and Volume // Solid State Phenomena. – 2017. – No. 265. – pp. 422-427.

8. Галимзянова Р.Ю., Макаров Т.В., Хакимуллин Ю.Н., Вольфсон С.И. Невысыхающие герметизирующие композиции на основе бутилкаучука //Химия, технология и использование полимеров. Вестник Казанского технологического университета № 2. – Казань, 2007. – С. 52–57.

9. Fang Q., Song B., Tee T., Tin Sin L., Hui D., Bee S. Investigation of dynamic characteristics of nano-size calcium carbonate added in natural rubber vulcanizate // Journal Composites. – 2014. Vol. B. No 60. – pp. 561–567.

10. Zhang R., He X., Lai Z., Yang D. Effect of some inorganic particles on the softening dispersion of the dynamics of butyl rubber // J. Polym. Bull. – 2017. No. 74. pp. 1031-1043.

11. Черкасов В.Д., Авдонин В.В., Пильщиков В.О., Аникина Н.С., Юркин Ю.В., Полимерные вяжущие для производства вибропоглощающих материалов. // Региональная архитектура и строительство. 2017. № 3 (32). С 59-57.

12. Lapcika L, Manasa D., Lapcikova B., Vasinia M., Staneka M., Sepeb K., Vlcek J., Watersd K., Greenwoode R., Rowsone N. Effect of filler particle shape on plastic-elastic mechanical behavior of high density poly(ethylene)/mica and poly(ethylene)/wollastonite composites // Composites. – 2018. Vol. B. No. 141. – pp. 92-99.

13. Лавров Н.А., Белухичев Е.В. Полимерные смеси на основе поливинилхлорида (обзор) // Пластические массы. С-Петербург. Гос. технич. универ. – № (3-4) 2020. – С. 55-59. DOI: 10.35164/0554-2901-2020-3-4-55-59.

14. Touaitia F., Alama P., Toivakka M., D.W. Bousfield D.W. Polymer chain pinning at interfaces in CaCO₃–SBR latex composites. // USA Materials Science and Engineering. 2010. Vol. A, no. 527. pp 2363-2369.

15. Zhong B., Jia Ch., Luo Yu, Jia D., Liu F. Understanding the effect of filler shape induced immobilized rubber on the interfacial and mechanical strength of rubber composites. // Polymer Testing. – 2017. – No. 58. pp. 31-39.

16. Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Авдонин В.В. Влияние типа наполнителя на динамические свойства вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата // Современные наукоемкие технологии. – 2018. – № 12-1. – С. 31-36;

17. Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Исследование тангенса угла механических потерь и прочности вибропоглощающих материалов на основе этиленвинилацетата, модифицированных каучуками. // Инженерный вестник Дона. 2019. № 8 (59). С. 35.

18. Черкасов В.Д., Волоцкой А.Н., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Влияние полярности наполнителей на динамические свойства вибропоглощающих полимерных композиционных материалов на основе этиленвинилацетата. // Региональная архитектура и строительство. 2020. № 1 (42). С. 52-62.

19. Модифицирующее влияние полибутена на свойства каучуков специального назначения / Р. М. Долин-

ская [и др.] // Труды БГТУ. № 4. Химия, технология органических веществ и биотехнология, 2010. – С. 182-184.

20. Syam Prasad Ammineni a, A. Kiran Kumar b, R. Chowdary c, A. Chandrakanth c, Pagidipalli Saidulu d// Frequency and temperature dependent viscoelastic properties of natural rubber and nitrile butadiene rubber at different temperatures for vibration damping applications: an experimental study // International Journal of Polymer Analysis and Characterization. Science Direct. – 2025. – Vol. 30, no. 3 P. 1-16. https // doi.org / 10.1023666x.2025.2453748

21. Смотров С. А. Разработка авиационных моделей с использованием полимерных материалов для решения задач аэроупругости // Сборник рефератов научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ. Серия 16: 29. Физика. 30. Механика. 41. Астрономия. 89. Космические исследования. – 2007. – № 6. – С. 213. doi: 030.06.2007.0213 04200618684

22. Ершова О.В., Ивановский С.К., Чупрова Л.В., Бахаева А.Н. Современные композиционные материалы на основе полимерной матрицы // Пензенский международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2015. – № 4. С.14-18.

23. H, L and E Chibowski. Surface free energy components of calcium carbonate and their changes due to radiofrequency electric field treatment // Journal of Colloid and Interface Science. – 1994. – Vol.164 (1). pp. 245-251. doi: 10.1006/jcis.1994.1163

24. E. Chibowski, E. and P. Staszczuk. Determination of Surface Free Energy of Kaolinite // Clays and Clay Minerals. – 1988. – Vol 36 (5). pp. 455-461. doi: 10.1346/CCMN.1988.0360511

25. F. Fenouillot, P. Cassagnau, C. Majeste. Uneven distribution of nanoparticles in immiscible fluids: Morphology development in polymer blends // Polymer. – 2012. – Vol.50. No. 6. pp. 1333-1350.

26. Lazic N, Budinski – Simendic J, Petrovic Z, Plavsic M. Modification of Dynamic Properties of SBR Rubber Composites with Silica Fillers // Materials Science Forum. – 2006. – Vol. 518. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.518.417

27. Gaohui W, Jian G, Qiang Z, Xiao Z. Fabrication and Dynamic Mechanical Properties Offly Ash/Epoxy Composites // Key Engineering Materials. – 2007. – Vol. 353-358. pp.1467-1470. doi: 10.4028/www.scientific.net/ kem.353-358.1467

28. Ершова О.В., Муллина Э.Р., Чупрова Л.В., Мишурина О.А., Бодьян Л.А. Изучение влияния состава неорганического наполнителя на физико-химические свойства полимерного композиционного материала // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 12-3. С. 487-491.

29. Репина И.И., Карпова Е.А., Игнатьева А.Д. Дисперсные добавки для строительных материалов на основе минеральных вяжущих // Вестник науки и образования северо-запада России. – 2015. – Т.1. № 3. – С. 98-100.

30. Нестеренкова А.И. Осипчик В.С. Тальконаполненные композиции на основе полипропилена // Пластические массы. – 2007. – № 6. – С.44-46.

31. Ферричко Т.Х. Основные принципы выбора и использования дисперсных наполнителей / Т.Ферричко. – Москва: Химия, 1981. – 30 с.

32. Тагер А.А. Физико-химия полимеров/ Москва: Научный мир, 2007. – 573 с.

33. Ерофеев В.Т., Тюряхин А.С., Тюряхин Т.П., Тиньгаев А.В. Эффективные модули двухфазных строительных



композитов с зернистым наполнителем // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2019. – Т.15 № 6. – С.407-414. doi.org/10.22363 /1815-5235-2019-15-6-407-414

34. Бобрышев А.Н., Ерофеев В.Т., Козомаров В.Н. Физика и синергетика дисперсно-неупорядоченных конденсированных композитных систем // Казанский национальный исследовательский технологический университет. Санкт-Петербург: Наука, 2012. – 474 с. ISBN 978-5-02-025495-4, 978-5-7103-2655-8.

35. Анфимов Б.Н., Белов Г.П. Роль химических поперечных связей между компонентами в формировании комплекса свойств композиционных полимерных материалов // Химия и физика полимеров в начале 21 века. Ч.1. Второй всероссийский Коргинский симпозиум (с международным участием) тезисы докладов. 2000. Черногоровка. ИПХФ РАН. – 2000. – С.125-128.

36. Dragan P. Uskokovic, S.K. Milonjic and D. Rakovic // Latest developments in advanced technologies Materials and processes. Scientific.Net. Избранные доклады, представленные на седьмой Конференция Югославского общества исследования материалов. 2005. – Герцег-Нови (Сербия и Черногория). 572 с.

37. Соловьев С. И., Иванова Т. Л. Современные вибропоглощающие материалы: свойства, применение, перспективы. // Технологии строительных материалов. – 2021. – №2. – С. 12–18.

38. Цыганов, Черкасов. Применение полимерных вибропоглощающих материалов в строительстве // Строительные материалы и изделия. – 2025. – №1 С. 151. DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.151.110>

39. Авдонин В.В., Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Вибропоглощающие вибрационные покрытия. // Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Пензенский государственный университет архитектуры и строительства". 2015.

40. Черкасов В.Д., Юркин Ю.В., Авдонин В.В., Проектирование состава наполненного вибропоглощающего материала. // Перспективные материалы. 2015. № 1. С. 49-57.

41. Соломатов В. И., Бобрышев А.Н., К. Г. Химмлер К.Г. Полимерные композиционные материалы в строительстве // В. И. Соломатов.– Москва.: Стройиздат, 1988. – 308 с. ISBN 5-274-00478-4.

42. Соломатов В.И., Выровой В.Н., Ерофеев В.Т. и др. монография // Полиструктурная теория композиционных строительных материалов. Ташкент: ФАН. – 1991. – 144 с.

43. Ч.Н. Нгуен, М.В. Сарьянова, И.Д. Симонов-Емельянов. Расчет составов дисперсных наполненных полимерных композиционных материалов с разной структурой. // Тонкие химические технологии. – 2020. – Т.15 (1). С. 62-66. Doi.org/10.32362/2410-6593-2020-15-1-62-66

44. Rothon R. Fillers for polymer application. Springer, 2017. – 489 с. doi.org/10.1007/978-3-319-28117-9

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 29.09.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 29.09.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.

Научная статья
УДК 691 + 693.977:624.016
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
БАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2025_4_130

ИНСТРУМЕНТЫ ПРАКТИЧЕСКОЙ РЕАЛИЗАЦИИ ГОСУДАРСТВЕННЫХ ПРОГРАММ РАЗВИТИЯ СТРАНЫ

- © Авторы 2025
SPIN: 1041-9513 **АНПИЛОВ Сергей Михайлович**
Заслуженный изобретатель РФ, Почетный строитель РФ, советник РААСН,
д.т.н., профессор кафедры ЖБК
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
«Сибстрин»
(Россия, Новосибирск, e-mail: anpilovsm@yandex.ru)
- SPIN: 9254-3688 **МАИЛЯН Левон Рафаэлович**
академик РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор
РААСН; Донской государственный технический университет
(Россия, Ростов-на-Дону)
- SPIN: 3971-7691 **СОРОЧАЙКИН Андрей Никонович**
доктор философских наук, эксперт
АНО ИССТЭ
(Россия, Тольятти)

Аннотация. В работе рассмотрены инструменты практической реализации государственных программ развития страны, с максимальным использованием местных сырьевых ресурсов, для обновления жилищного фонда и повышения благосостояния населения, которые установлены Указом Президента Российской Федерации от 07 мая 2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года».

Ключевые слова: местные сырьевые ресурсы; строительные материалы; инновационные строительные конструкции; быстровозводимые здания; государственные программы развития

Для цитирования: Анпилов С.М., Маилян Л.Р., Сорочайкин А.Н. Инструменты практической реализации программ развития страны // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 130-135. doi:10.51608/26867818_2025_4_130.

Original article

TOOLS FOR PRACTICAL IMPLEMENTATION OF STATE DEVELOPMENT PROGRAMS

- © The Author(s) 2025 **ANPILOV Sergey Mikhailovich**
doctor of technical sciences, professor of the Department
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering
(Sibstrin) (Russia, Novosibirsk)
- MAILYAN Levon Rafayelovich**
Academician of RAACS, Honored Builder of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof.
RAACS, Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)
- SOROCHAIKIN Andrey Nikonovich**
Dr. of Philosophy
INO "IFCTE" (Tolyatti, Russia)

Abstract. The paper discusses the tools for the practical implementation of the country's development programs, with maximum use of local raw materials, to update the housing stock and improve the welfare of the population, which were established by



the Decree of the President of the Russian Federation No. 309 dated May 7, 2024, "On the National Development Goals of the Russian Federation for the Period up to 2030 and Beyond 2036".

Keywords: local raw materials; construction materials; innovative construction structures; prefabricated buildings; state development programs

For citation: Anpilov S.M., Mailian L.R., Sorochaykin A.N. Tools for practical implementation of state development programs // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 130-135. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_130.

Введение. Государственные программы развития страны установлены Указом Президента Российской Федерации от 07 мая 2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года». Инструмент реализации национальных целей – Национальные проекты России [1].

Единый план по достижению национальных целей развития Российской Федерации на период до 2030 года и на плановый период до 2036 года (далее – Единый план) сформирован в соответствии с поручением Президента Российской Федерации и определяет стратегические приоритеты Правительства Российской Федерации по достижению национальных целей и характеризующих их показателей на ближайшую перспективу до 2036 года.

Национальная цель – это совокупное представление о модели будущего Российской Федерации, способного удовлетворить интересы населения при имеющихся финансовых возможностях на основе имеющегося опыта.

Так для реализации государственных программ перед строительной отраслью страны установлены целевые показатели и задачи, выполнение которых характеризует достижение национальной цели «комфортной и безопасной среды для жизни», в том числе:

- улучшение качества среды для жизни в населенных пунктах; Важным является повышение требований к комфорту и безопасности среды для жизни: качество, комфортность и доступность жилья, качество городской среды, экологии, развитию культурной и досуговой среды.

- обеспечение граждан жильем;
- обновление жилищного фонда в стране;
- сокращение непригодного (ветхого) жилищного фонда в стране;
- повышение доступности жилья на первичном рынке;
- завершение к 2030 году капитального ремонта зданий общеобразовательных организаций, признанных по состоянию на 1 января 2025 г. и др. [2].

Объект исследования – инновационные, быстровозводимые строительные системы высокой заводской готовности, строительные технологии, конструкции, местные строительные материалы.

Цель настоящей работы – выявление инструментов практической реализации государственных программ развития страны.

Основная часть. Для определения направлений исследований по созданию комфортной среды для проживания граждан России во всех населенных пунктах страны, проведен анализ статистических сведений. По данным сайта Банка ДОМ.РФ ежегодные объемы ввода жилья в 2020–2024 годах в РФ превысили 100 млн. м², в том числе по структуре доля индивидуального жилищного строительства составила более 60% [3], см. Таблицу 1. В то же время, средняя площадь введенной в 2024 году одной квартиры в МКД составила 42,5 м², а в ИЖС – 133 м² [4]. Себестоимость квадратного метра жилья в ИЖС выходит намного дешевле, чем в многоэтажной застройке – МКД. Одним из преимуществ ИЖС, помимо комфортности, экологичности – возможность практически за ту же стоимость получить большую площадь – простор для многодетной семьи.

Таблица 1 – Ежегодные объемы ввода жилья в млн. м², по годам

2020			2021			2022		
МКД	ИЖС	Σ	МКД	ИЖС	Σ	МКД	ИЖС	Σ
42,4	39,2	82,2	43,5	49,1	92,6	45,5	57,2	102,7
2023			2024					
МКД	ИЖС	Σ	МКД	ИЖС	Σ			
51,7	58,7	110,4	45,5	62,3	107,8			

где МКД – многоквартирный жилой дом, ИЖС – индивидуальный жилой дом; Σ – всего, в млн. м².

Проведен анализ текущего состояния жилищного фонда РФ, позволяющий прогнозировать его состояние на долгосрочную перспективу, планировать необходимые объемы для достижения национальных целей и программ развития страны. Рассмотрены пути решения проблем ликвидации ветхого и аварийного жилого фонда, способы модернизации объектов капитального строительства первых массовых серий в Российской Федерации и Республике Беларусь, обобщен практический опыт внедрения инновационных технологий. Даны предложения по возможному использованию предлагаемых инновационных технологий, строительных конструктивных систем и местных строительных материалов в государственных программах развития, восстановления территорий и экономики страны, создания новых рабочих мест [5-10].

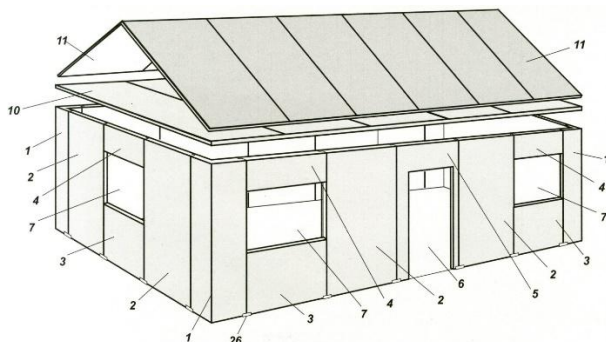


Рисунок 1 – Схема строительной системы сооружения из модульных элементов высокой заводской готовности [11]

где: 1 – угловой сборный элемент; 2 – рядовой сборный элемент; 3 – подоконный сборный элемент; 4 – надоконный сборный элемент; 5 – дверной сборный элемент с дверным проёмом – 6; 7 – оконный проём; 10 – модульный сборный элемент перекрытия или основания (пола); 11 – модульный сборный элемент покрытия; 26 – крепежный элемент, уголок

Предложены инструменты для практической реализации национальных программ развития страны в виде быстровозводимых строительных систем высокой заводской готовности. Разработаны унифицированные модульные сборно-разборные элементы, изготовленные по заданным Заказчиками размерам, которые кратны размерам листового материала, используемых для обшивки каркаса и входящих в набор модульных сборных элементов: для устройства стен, перекрытий, покрытий, кровли. Из набора модульных сборных элементов производят предварительную сборку объемных крупно-блочных элементов в виде блок-комнат, из которых строят энергоэффективные, быстровозводимые, экологически безопасные сооружения, *рис. 1–5.*



Рисунок 2 – Этапы возведения здания пожарного депо, с. Троицкое, Оренбургская область из быстро возводимых строительных систем высокой заводской готовности

Данное решение позволяет сократить номенклатуру изготавливаемых и комплектующих изделий, для строительства энергоэффективных, экологически безопасных сооружений.

Номенклатура изделий высокой заводской готовности из унифицированных модульных сбор-

ных элементов, значительно сократит отходы листового материала и производства в целом, повысит производительность труда на производстве и строительной площадке и, как следствие, снизит себестоимость строительства сооружения в целом.



Рисунок 3 – Этапы возведения здания пожарного депо, с. Троицкое, Оренбургская область, из быстро возводимых строительных систем высокой заводской готовности. Модульные сборные элементы фасада здания

По предложению, в строительстве сооружений используют базовый модульный принцип высокой заводской готовности. В предлагаемом решении в качестве базового модуля принят размеры листовых материалов, ДСП, ДВП, OSB, фанера и другие, габаритные размеры которых определяют кратность размеров всех модульных элементов.

Каркас каждого сборного модульного элемента изготавливают из легких стальных компонентов С-образного профиля, изготавливаемого на профилегибочных автоматических линиях. В дальнейшем, для возведения сооружения принят базовый модуль – исходного листового материала местного производства, с размерами, определяемыми по формулам (1, 2).

$A = a \times 1/n_a + a \times m_a(1)$ или $A = b \times 1/n_b + b \times m_b(2)$,
где:

- А – ширина сборного модульного элемента;
- а, b – габариты листового материала;
- n_a, n_b – множитель, а или b (1, 2, 3, 4...);
- m_a, m_b – множитель а или b (0, 1, 2, 3, 4...).

На каждом модульном сборном элементе листовый материал закрепляют с обеих сторон к С-образному профилю, с симметричным сдвигом наружу не более чем на $\frac{1}{2}$ ширины С-образного профиля, внутренне пространство между наружным и внутренним листовым материалом, заполняют утеплителем.

Обеспечение модульности и технологичности заводского изготовления сборных модульных элементов, не требует значительной материально-технической базы, простота сборки-разборки и трансформации модуля здания, возможность транспортировки сборно-разборной строительной системы по



форме стандартного груза с целью уменьшения затрат на логистику, возможность установки модуля здания в отсутствии фундамента на выровненную поверхность грунта.

Небольшой вес каждого элемента строительной системы предоставляет возможность на строительной площадке производить их монтаж (сборку) без грузоподъемных механизмов. Монтаж из крупно-блочных готовых модулей значительно сокращает время возведения объекта и снизить себестоимость работ.



Рисунок 4 – Этапы возведения здания многопостовой мойки автомобилей в г. Самара из быстро возводимых модульных строительных систем высокой заводской готовности



Рисунок 5 – Этапы возведения здания многопостовой мойки автомобилей в г. Самара из быстро возводимых модульных строительных систем высокой заводской готовности

На рис. 6 представлена модульная, быстро-возводимая строительная система, предназначенная для возведения как модульного отдельно стоящего здания, так и комплекса зданий, собранного из отдельных модульных зданий, жестко скрепленных между собой с возможностью возведения комплекса сблокированных из отдельных зданий под одной крышей. Строительная система высокой заводской готовности может быть использована для возведения зданий и сооружений в отдаленных и труднодоступных районах с доставкой в них комплекта элементов модулей здания в разобранном виде в форме компактного штабеля сухопутным или морским транспортом.

Быстровозводимая сборно-разборная строительная система для модуля здания состоит из отдельно выполненных модульных панелей основа-

ния-пола, стен и потолка, которые при сборке соединяются между собой крепежными элементами на модульной панели основания-пола, снабжена стойками и распорками, модульные панели стен с помощью монтажной траверсы смонтированы по наружному периметру модульной панели основания-пола, а модульная панель потолка размещена на верхних торцах установленных по периметру модульной панели основания-пола модульных панелей стен, причем стойки установлены по углам панели основания-пола, а распорки соединены со стойками по верхним концам и образуют каркас модуля здания, с которым скреплены модульные панели стен, а также соединены они и друг с другом крепежными элементами, причем так, что пара продольных панелей стен скреплена с парой поперечных панелей стен по торцам [12].

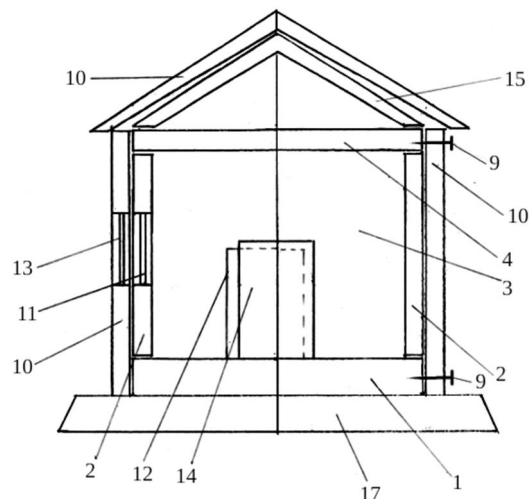


Рисунок 6 – Схема модуля сооружения из модульных элементов высокой заводской готовности [12]

где 1 – панель основания пола, входящая в строительную систему; 2 – продольные и 3 – поперечные панели стен; 4 – модульная панель потолка; 9 – крепежный элемент; 10 – строительная система для возведения комплекса сблокированных зданий под одной крышей; 11 – оконный проём; 12 – дверной проем; 13 – дополнительно установленные спаренные конструкции окон и дверей – 14; 15 – дополнительные утепленные сэндвич панели; 17 – грунтовое основание

Возводят здание и или сооружение следующим образом. На заранее подготовленное основание и или фундамент устанавливают объемные элементы блок-комнат или стеновые модульные сборные элементы на предварительно уложенные тепло-звукоизоляционные материалы, крепят их к основанию и между собой соединительными, крепежными элементами. Возводят сооружение в разных сочетаниях, в зависимости от проектных и объемно-планировочных решений объекта. Для сокращения тепловых потерь наружными ограждающими конструкциями здания, изготавливают окон-



ные и дверные проемы с откосами для установки по меньшей мере независимых спаренных контуров из оконных и дверных конструкций.

По результатам теоретических и прикладных научных исследований, авторами предложены инструменты практической реализации национальных целей развития страны в виде конструктивных решений и быстровозводимых строительных систем высокой заводской готовности, прорывных инновационные технологии, которые обеспечивают:

- круглогодичное возведение «сухим методом» объектов и сооружений из строительных быстровозводимых систем высокой заводской готовности;

- совмещение этапов жизненного цикла и применение поточного метода возведения объектов капитального строительства, параллельное ведение процессов проектирования объектов и изготовления быстровозводимых строительных систем;

- снижение себестоимости объектов капитального строительства;

- сокращение сроком возведения объектов.

Результаты исследований внедрены и получили многофункциональное применение на более чем 100 объектах капитального строительства различного назначения во многих регионах страны:

- Здания: МФЦ (многофункциональные центры предоставления государственных и муниципальных услуг), почтовые отделения, офисы, автосалоны, автомойки на 6–12 постов, СТО: Бузулук, Запорожская обл., Кемерово, ЛНР, Оренбургская обл., Самара, Тольятти, Уфа;

- Здания объектов медицинского назначения (150–1500 кв. м.): модули ангиограф, КТ (компьютерная томография), МРТ (магнитно-резонансная томография), рентген, ФАП (фельдшерско-акушерский пункт для оказания первичной медико-санитарной помощи в сельской местности), стоматологическая поликлиника: Волгоградская обл., Запорожская обл., Краснодарский край, Крым (Севастополь, Симферополь), Москва, Московская обл., Мурманская обл., Пенза, Самарская область, Самара, Сочи, Тольятти, Челябинская обл., Чита, Элиста;

- Здания гостиниц: Абхазия, Башкирия, Крым, Самарская область;

- Индивидуальные и многоквартирные жилые дома: Крым, Оренбургская область (Первомайский, Ясный), Самарская область, Саратовская область, Сочи;

- Здания кафе, ресторанов, сети торговых центров «Миндаль»: Казань, Самарская область;

- Здания пожарных депо, производственных, административных, складских объектов: на острове Диксон, в Казани, Оренбургской обл. (с.

Троицкое), Самаре, Сызрани, Уфе, Новокуйбышевске, Тольятти и др.

В качестве инструментов практической реализации национальных целей развития страны, разработаны технические решения быстро возводимых строительных систем высокой заводской готовности сборно-разборных полевых защитных сооружений, необходимых министерству обороны страны. Которые предназначены для защиты личного состава и техники от воздействия воздушных атак, в том числе беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), и артиллерийского обстрела противника, а также для укрытия от атмосферных воздействий и непогоды, и может быть использовано при строительстве окопов, траншей, возводимых с использованием инженерного оборудования в районах сосредоточения войск и военных действий. Модульные быстровозводимые элементы защитного фортификационного сооружения, изготавливаемые промышленным способом, позволяют оперативно и с наименьшими логистическими затратами доставить их к месту назначения, для защиты личного состава, техники, различных сооружений и объектов социального назначения от разрушительных последствий при авариях или катастрофах, от падения летательных аппаратов, либо высокоскоростных тел. Применяемые инновационные материалы, строительные конструкции и быстровозводимые технологические решения подробно изложены в работах [11–18].

Выводы. Результаты исследований востребованы реальным сектором экономики и получили многофункциональное применения на объектах капитального строительства различного назначения во многих регионах страны.

Мировая новизна теоретических, экспериментальных, прикладных исследований и разработанных инновационных технических решений подтверждены патентами РФ на изобретения [11–18].

Для практической реализации национальных целей развития страны, для обновления жилищного фонда, для повышения благосостояния населения страны, для создания новых рабочих мест предлагается в качестве инструмента распространить имеющийся опыт по внедрению в экономику строительной отрасли страны инновационных, импортозамещающих, быстровозводимых, экономически конкурентоспособных строительных систем высокой заводской готовности.

Библиографический список

1. Указ Президента Российской Федерации от 07 мая 2024 № 309 «О национальных целях развития Российской Федерации на период до 2030 года и на перспективу до 2036 года» URL: <http://www.kremlin.ru/acts/bank/50542/page/1> (дата обращения 01.11.2025)



2. Единый план по достижению национальных целей развития, утвержден Председателем Правительства РФ, URL: <http://government.ru/docs/53927/>

3. Сайт Банка ДОМ.РФ
URL: https://наш.дом.рф/аналитика/ввод_жилья

4. Сайт Банка ДОМ.РФ
URL: <https://www.irm.ru/news/156054-bank-domrf-nazval-srednyuyu-ploschad.html>,
<https://наш.дом.рф/аналитика/квартирография>

5. Анпилов, С. М. Инновационные технологии для быстровозводимых объектов массового строительства / С. М. Анпилов, Н. М. Зайченко, Л. Р. Маилян // Инженерная экономика : Материалы международной научно-технической конференции, Минск, 27–28 ноября 2024 года. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2024. – С. 610-629. – EDN WIKYFM.

6. Анпилов, С. М. Научная деятельность БНТУ и НГАСУ (СИБСТРИН): сборник о международной деятельности по практическому исполнению соглашений о сотрудничестве между БНТУ и НГАСУ (СИБСТРИН), о выполненных научно-исследовательских работах : / С. М. Анпилов. – Тольятти : Институт судебной строительно-технической экспертизы, 2025. – 212 с. – EDN TVFOTO.

7. Анпилов, С. М. Экологичные конструктивные системы, материалы и быстровозводимые технологии строительства / С. М. Анпилов, Н. М. Зайченко, Л. Р. Маилян // Актуальные экологические проблемы современных городов : сборник материалов II национальной научно-практической конференции с международным участием, Иваново, 18 декабря 2024 года. – Иваново: Ивановский государственный политехнический университет, 2025. – С. 13-18. – EDN XIALOI.

8. Опыт практической реализации инновационных строительных материалов и изделий / С. М. Анпилов, В. Т. Ерофеев, В. И. Римшин [и др.] // Строительные материалы. – 2024. – № 8. – С. 31-39. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-827-8-31-39. – EDN DDPCZE.

9. Способы продления жизненного цикла зданий с деревянными перекрытиями / Ю. Л. Сколубович, С. М. Анпилов, Д. А. Добровольский [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2024. – № 9(789). – С. 88-103. – DOI 10.32683/0536-1052-2024-789-9-88-103. – EDN JDYWRB.

10. Инновационные технологии строительства быстровозводимых зданий и сооружений / С. М. Анпилов,

В. Т. Ерофеев, В. И. Римшин [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 8. – С. 5-13. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.08.05-13. – EDN CXDPSN.

11. Патент № 2582241 С2 Российская Федерация, МПК E04B 1/00, E04B 1/02, E04C 2/36. Способ строительства энергоэффективных, экологически-безопасных сооружений из сборных конструкций : № 2014124281/03 : заявл. 16.06.2014 : опубл. 20.04.2016 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN LYLOYU.

12. Патент № 2846956 С1 Российская Федерация, МПК E04B 1/343. Быстровозводимая сборно-разборная строительная система : заявл. 24.12.2024 : опубл. 22.09.2025 / С. М. Анпилов. – EDN KGDMKC.

13. Патент № 2833182 С1 Российская Федерация, МПК E04H 9/12. Защитное фортификационное сооружение : заявл. 25.03.2024 : опубл. 15.01.2025 / С. М. Анпилов, В. Т. Ерофеев, С. Н. Леонович [и др.]. – EDN UKUMKA.

14. Патент № 2552506 С1 Российская Федерация, МПК E04B 2/86. Способ возведения монолитных конструкций зданий и несъемная универсальная модульная опалубочная система : № 2014105016/03 : заявл. 11.02.2014 : опубл. 10.06.2015 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN FNUUAY.

15. Патент № 2561127 С1 Российская Федерация, МПК E04G 11/40, E04B 5/40. Несъемная опалубка монолитного перекрытия : № 2014111706/03 : заявл. 26.03.2014 : опубл. 20.08.2015 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. С. Анпилов [и др.]. – EDN ZFJZED.

16. Патент № 2561135 С2 Российская Федерация, МПК E04B 2/84. Комплект несъемной опалубки, способ ее сборки и способ возведения монолитных стен здания и сооружения в несъемной опалубке из модульных элементов : № 2013156220/03 : заявл. 17.12.2013 : опубл. 20.08.2015 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. С. Анпилов [и др.]. – EDN ULIPZO.

17. Патент № 2835925 С1 Российская Федерация, МПК E04H 9/12. Фортификационное сооружение : заявл. 11.04.2024 : опубл. 07.03.2025 / С. М. Анпилов, В. Т. Ерофеев, С. Н. Леонович [и др.]. – EDN ZMCJTG.

18. Патент № 2835931 С1 Российская Федерация, МПК E04H 9/00. Защита сооружений : заявл. 17.06.2024 : опубл. 06.03.2025 / С. М. Анпилов, В. Т. Ерофеев, С. Н. Леонович [и др.]. – EDN PBLZXE.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 03.09.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 03.09.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.



Научная статья
УДК 691
ГРНТИ: 67 Строительство и архитектура
БАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия
doi:10.51608/26867818_2025_4_136

КОМПОЗИТНАЯ АРМАТУРА: «ЗА» И «ПРОТИВ»

© Авторы 2025
Author ID: 978374

ГАБРУСЕНКО Валерий Васильевич
кандидат технических наук, доцент
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (СИБСТРИН) (Россия, Новосибирск, e-mail: gabr1941@mail.ru)

Аннотация. Рассмотрены достоинства и недостатки композитной полимерной арматуры, влияние их на работу несущих конструкций, Указаны ограничения по использованию арматуры, приведены экономически оправданные области применения бетонных конструкций с композитной арматурой. Обращено внимание на недопустимую лживость рекламы композитной полимерной арматуры.

Ключевые слова: композитная полимерная арматура; достоинства и недостатки; ограничения; области применения; строительные материалы

Для цитирования: Габрусенко В.В. Композитная арматура: «за» и «против» // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 136-139. doi:10.51608/26867818_2025_4_136.

Original article

COMPOSITE FITTINGS: PROS AND CONS

© The Author(s) 2025

GABRUSENKO Valery Vasilyevich
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin)
(Russia, Novosibirsk)

Abstract. The article considers the advantages and disadvantages of composite polymer fittings and their influence on the work of load-bearing structures. The limitations on the use of the fittings were indicated, and economically justified areas of application of concrete structures with composite reinforcement were given. Attention is drawn to the unacceptable falsehood of advertising of composite polymer fittings.

Keywords: composite polymer fittings; advantages and disadvantages; limitations; application areas; building materials

For citation: Boyko V.G. Composite fittings: pros and cons // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 136-139. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_136.

Композитная арматура обладает уникальными физико-химическими свойствами – радиопрозрачностью, немагнитностью, электрической непроводимостью и высокой коррозионной стойкостью при вчетверо меньшем удельном весе (около 2 г/см³), чем стальная арматура. К тому же, ее прочность сопоставима с прочностью стальной арматуры самых высоких классов – от А800 до Вр1400 (табл. 1).

Эти достоинства вызвали бурный ажиотаж в строительном сообществе. Образовалась Ассоциация неметаллической композитной арматуры со штаб-квартирой в НИИЖБе, разработаны ГОСТ 31398-2012 «Арматура композитная полимерная для

армирования бетонных конструкций. Общие технические условия» [1], СТО НОСТРОЙ 2.6.90-2013 «Применение в строительных бетонных и геотехнических конструкциях неметаллической композитной арматуры» [2], позднее и Свод правил СП 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования» [3].

Растёт число производителей композитной (в основном, стеклокомпозитной) арматуры. В печати, на «круглых столах» и в рекламе всё чаще появляются утверждения типа: «Можно спокойно заменять стальную арматуру, например, диаметром 12 мм



композитной диаметром 8 мм» или «Прочность стеклопластиковой арматуры в 2 – 2,5 раза выше стальной. Стеклопластик легче стали в 4 раза, а при равнопрочной замене в 8 – 10 раз» и т. п.

Таблица 1 – Показатели полимеркомпозитной арматуры

Наименование	АСК	АБК	АУК	ААК	АКК
Предел прочности при растяжении R_{fn} , МПа	1000	1000	1400	1400	1000
Модуль упругости при растяжении E_f , ГПа	50	50	130	70	60
Относительное удлинение при разрыве δ , %	2,0	2,0	1,1	2,0	1,0

Примечания. 1. В таблице обозначены следующие виды арматуры: АСК – стеклокомпозитная, АБК – базальтокомпозитная, АУК – углекомпозитная, ААК – арамидкомпозитная, АКК – комбинированная композитная.

2. Модуль упругости стальной арматуры $E_s = 200$ ГПа.

Чтобы знать, оправданно ли столь восторженное отношение к композитной полимерной арматуре (сокращенно, АКП), стоит напомнить о некоторых ее (не очень афишируемых) физико-механических свойствах.

1. У композитной арматуры отсутствуют пластические деформации, т. е. деформируется она строго по закону Гука с очень небольшим удлинением при разрыве. Из этого следует:

а) конструкции, армированные АКП, имеют хрупкий, внезапный (т.е. наиболее опасный) характер разрушения, что требует введения значительных запасов прочности при расчете таких конструкций или снижения расчетного сопротивления арматуры R_f (табл. 2),

б) стержни АКП невозможно загнуть, т. е. невозможно создавать «лапы» и «крюки», необходимые для их анкерования в бетоне и для создания пространственных каркасов. Невозможно на них по концам высаживать и анкерные головки – ни холодным, ни горячим способами.

Таблица 2 – Расчетное сопротивление полимеркомпозитной арматуры растяжению R_f , МПа, (при коэффициенте вариации $v \leq 0,15$)

Условия эксплуатации	АСК	АБК	АУК	ААК	АКК
Во внутренних помещениях	530	600	750	750	530
На открытом воздухе и в грунте	470	530	650	650	470

Примечание. Расчетное сопротивление стальной арматуры класса А500 $R_s = 435$ МПа. Арматуру класса А600 с расчетным сопротивлением $R_s = 525$ МПа применяют только в качестве предварительно напряженной, в обычных конструкциях свою прочность она недоиспользует.

Как видно из табл. 2, расчетное сопротивление наиболее распространенной стеклокомпозитной арматуры при эксплуатации на открытом воздухе и в грунте мало отличается от расчетного сопротивления стальной арматуры класса А500, и слова о в 2 – 2,5 раза более высокой ее прочности есть рекламный трюк на грани мошенничества. Об эксплуатации в закрытых помещениях будет сказано ниже.

Но это не все: дополнительное (на величину до 24%) снижение прочности АКП может произойти в результате агрессивного воздействия щелочной среды, всегда в той или иной степени присутствующей в бетоне. Снижение прочности может произойти также под воздействием ультрафиолетовых лучей, т.е. при хранении арматуры под открытым небом.

2. АКП не сваривается. В совокупности с невозможностью загибания стержней это приводит к тому, что

а) стыковать арматуру можно только в нахлестку, с перехлестом длиной не менее длины зоны анкеровки l_{an} ,

б) сетки и каркасы могут быть только плоскими и только вязаными, с последующей пропиткой мест пересечения стержней дорогостоящей эпоксидной смолой [3]. Предлагаемые ГОСТ Р 58964 [4] способы создания сеток для армирования каменной кладки с помощью полимерных крестовин или вплетением полимеризованных стержней в неполимеризованные стержни перпендикулярного направления с последующей их полимеризацией требуют больших дополнительных затрат, да и диаметр таких стержней невелик, не более 4 мм.

3. Поскольку поперечные стержни АКП нельзя ни приварить к продольным, ни загнуть вокруг них, то продольные сжатые стержни невозможно предохранить от потери устойчивости. Отсюда следует, что в сжатых (колоннах) и в сжатой зоне изгибаемых элементов (балках, плитах) композитную арматуру применять в качестве рабочей нельзя. По этой причине в СП [3] расчетное сопротивление сжатию принято равным нулю.

4. Поскольку поперечную композитную арматуру нельзя заанкерить в бетоне ни с помощью приварки к продольной арматуре, ни загибом вокруг нее «крюками» либо «лапами», ни с помощью высаженных головок, то для обеспечения прочности наклонных сечений на поперечные стержни, с целью предотвращения их выдергивания из бетона, необходимо устанавливать концевые анкеры, что существенно увеличивает стоимость изделий (к тому же, надежны концевые анкеры пока нет). При их отсутствии анкерование поперечных стержней обеспечивается только силами сцепления с бетоном, что резко снижает несущую способность наклонных сечений в

опорных участках и делает применение АКП проблематичным. Поясним примером (см. рисунок).

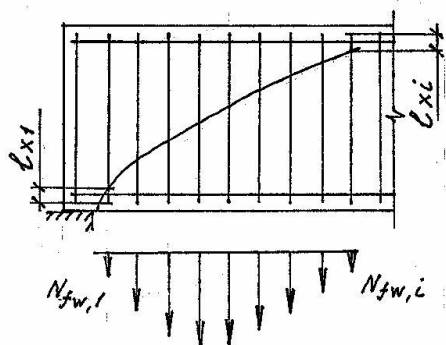


Рис. Распределение усилий в поперечных стержнях, пересекающих наклонное сечение

Усилие в арматуре при выдергивании определяется из условия:

$$N_{fw} = R_{fw} A_{fw} (l_x / l_{an}),$$

где $R_{fw} = 0,8 R_f$ – расчетное сопротивление поперечной АКП,

A_{fw} – площадь сечения стержня (или всех стержней в одном створе),

l_x – фактическая длина заделки стержня в бетоне,

l_{an} – расчетная длина анкеровки стержня в бетоне, необходимая для 100%-ного использования его прочности при выдергивании. Для арматуры АСК она составляет от 40 (в бетоне класса В60) до 75 (в бетоне класса В15) диаметров стержня.

Из рисунка видно, что в начале и в конце наклонного сечения длина заделки поперечных стержней l_x ничтожно мала, и столь же мала их несущая способность. По мере приближения к середине наклонного сечения длина заделки растет, но достигнет ли она значения l_{an} , зависит от высоты сечения конструкции, диаметра поперечной арматуры и класса бетона.

Из приведенного следует, что композитную поперечную рабочую арматуру без концевых анкеров применять опасно, прочность наклонных сечений она не обеспечивает, а численно оценить ее несущую способность с достаточной точностью невозможно.

5. Композитная арматура обладает низким модулем упругости E_f (табл. 1). Отсюда следует, что ширина раскрытия нормальных трещин a_{crc} , определяемая по формуле (практически такой же, как и для железобетонных конструкций) $a_{crc} = \varphi_1 \varphi_2 \varphi_3 \psi_f (\sigma_f / E_f) l_f$, при прочих равных условиях будет во столько же раз большей, во сколько модуль упругости композитной арматуры E_f меньше модуля упругости стальной E_s . Иначе говоря, для обеспечения равной ширины раскрытия трещин потребуется установить, например, арматуры АСК в 4 раза больше, чем стальной.

Аналогичная ситуация с жесткостью D изгибаемых конструкций, имеющих трещины в растянутой зоне, которую определяют по формуле $D = E_{f,red} A_f z (h_0 - x_m)$ и которая напрямую влияет на кривизну изгибаемого элемента и на его прогиб, а сама она, как видно из формулы, напрямую зависит от модуля упругости арматуры.

Отсюда следует, что применение в изгибаемых элементах композитной продольной растянутой арматуры экономически неэффективно.

Заметим, что в конструкциях без трещин модуль упругости арматуры на величину жесткости влияет незначительно. Мало влияет он и на момент образования трещин.

6. При температуре $t > 60^\circ\text{C}$ композитная арматура начинает терять прочность, а при $t > 90^\circ\text{C}$ – безвозвратно. Отсюда следует, что бетонные конструкции с такой арматурой обладают крайне низкой огнестойкостью и применять их можно только в сооружениях, не подверженных риску воздействия огня, т.е. эксплуатируемых на открытом воздухе или в грунте.

7. При резке АКП образуется исключительно вредная для здоровья людей мельчайшая стеклопыль, потому в работе с этой арматурой требуются особо строгие меры безопасности.

Таким образом, область рационального применения композитной арматуры чрезвычайно мала. Из нее исключаются сжатые элементы, значительная часть изгибаемых элементов (в первую очередь те, где есть ограничения по ширине раскрытия нормальных трещин, и те, где по расчету необходима поперечная арматура), а также все конструкции, которые могут быть подвергнуты высокой температуре при эксплуатации (пожару).

Порой можно встретить публикации о конструкциях с комбинированным армированием, у которых часть арматуры композитная, а часть стальная. Такое решение, однако, находится на грани абсурда: в нем совмещены недостатки композитной арматуры (см. выше) и недостатки стальной (отсутствие радиопрозрачности, электропроводимость, более высокая склонность к коррозии).

Наиболее перспективными областями применения композитной арматуры в бетоне, на наш взгляд, являются,

– во-первых, те конструкции, где требуется радиопрозрачность и диэлектрические свойства и где стальную арматуру нельзя применять в принципе;

– во-вторых, конструкции, которые чрезвычайно быстро выходят из строя из-за коррозии стальной арматуры и в которых использовать композитную арматуру экономически оправданно, даже с учетом всех ее недостатков;

– в-третьих, предварительно напряженные конструкции, в которых кроме напрягаемой арма-



туры другой арматуры не требуется (аэродромные и дорожные плиты, цилиндрические резервуары и т.п.), которые эксплуатируются на открытом воздухе и нуждаются в повышенной коррозионной стойкости. Но для этого нужно создать надежные, удобные в работе и относительно дешевые захваты (зажимы) многоразового использования.

Именно с преднапряженного «композитобетона» в 1970-е годы началось «первое пришествие» стеклопластиковой (стеклокомпозитной) арматуры в нашу страну. И именно из-за отсутствия надежных и недорогих зажимов для натяжения арматуры оно быстро окончилось.

Библиографический список

1. ГОСТ 31938-2022 Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций / введен 2022-09-01 взамен ГОСТ 31938-2012. – М.: Российский институт стандартизации, 2022. – 19 с.
2. СТО НОСТРОЙ 2.6.90-2013 Применение в строительных бетонных и геотехнических конструкциях неметаллической композитной арматуры. – М.: НОСТРОЙ, 2014. – 115 с.
3. СП 295.1325800.2017 Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2024. – 48 с.
4. ГОСТ Р 58964-2020 Сетка композитная полимерная для армирования кирпичной кладки. – М.: Стандартинформ, 2020. – 15 с.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.10.2025; одобрена после рецензирования 08.12.2025; принята к публикации 08.12.2025.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 26.10.2025; approved after reviewing 08.12.2025; accepted for publication 08.12.2025.

РЕЦЕНЗИИ

Рецензия

УДК 691

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_2025_4_140

РЕЦЕНЗИЯ НА УЧЕБНИК:

СЕЛЯЕВ В.П., УТКИНА В.Н. «ОСНОВЫ РАСЧЕТА И ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ» ЧАСТЬ 1 «ОСНОВЫ РАСЧЕТА ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ»

© Автор 2025

SPIN: 1041-9513

АНПИЛОВ Сергей Михайлович

Заслуженный изобретатель РФ, Почетный строитель РФ, советник РААСН,
д.т.н., профессор кафедры ЖБК

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет
«Сибстрин»*

(Россия, Новосибирск, e-mail: anpilovsm@yandex.ru)

Аннотация. Учебник «Основы расчёта и проектирования железобетонных конструкций» предназначен для подготовки инженеров-строителей. Первая часть: «Основы расчёта железобетонных конструкций» состоит из десяти разделов. В первой главе даны основные сведения об истории развития железобетонных конструкций, рассмотрены физические принципы создания на основе бетона и арматуры нового конструкционного материала, который по ряду свойств превосходит свойства бетона и арматуры, взятых отдельно друг от друга.

Ключевые слова: строительные конструкции; железобетонные конструкции; проектирование и расчет железобетонных конструкций; железобетон; теория сопротивления железобетонных конструкций

Для цитирования: Анпилов С.М. Рецензия на учебник: Селяев В.П., Уткина В.Н. «Основы расчета и проектирования железобетонных конструкций» часть 1 «Основы расчета железобетонных конструкций» // Эксперт: теория и практика. 2025. № 4 (31). С. 140-141. doi:10.51608/26867818_2025_4_140.

Review

REVIEW OF THE TEXTBOOK:

SELYAEV V.P., UTKINA V.N. "BASICS OF CALCULATION AND DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES" PART 1 "BASICS OF CALCULATION OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES"

© The Author(s) 2025

ANPILOV Sergey Mikhailovich

doctor of technical sciences, professor of the Department

*Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering
(Sibstrin) (Russia, Novosibirsk)*

Abstract. The textbook "Basics of Calculation and Design of Reinforced Concrete Structures" is intended for the training of construction engineers. The first part: "Basics of Calculation of Reinforced Concrete Structures" consists of ten sections. The first chapter gives basic information about the history of the development of reinforced concrete structures, considering the physical principles of creation on the basis of concrete and fittings of the new construction material. This material, by a number of properties, exceeds the properties of concrete and fittings taken separately from each other. The methods of construction of reinforced concrete structures are considered. The second chapter discusses the formative and strength characteristics of steel fittings and cement concrete, as well as the circumstances surrounding the creation of reinforced concrete, whose qualities, according to several metrics, are superior to those of concrete and fittings. In the third chapter, the basic principles of creating a theory of resistance of reinforced concrete structures to force influences are considered. In the fourth chapter, methods of construction with prestressed fittings are considered. In the six following chapters, the features of calculation and design of reinforced concrete structures working on compression, stretching, and bending are considered; methods of calculation according to the limit states of the first and second groups. The textbook reflects new regulations that help to improve the reliability of building structures. The information is presented in a clear and concise way, with easy-to-understand drawings and calculation charts. I think it is appropriate to recommend the textbook "Basics of Calculation of Reinforced Concrete Structures" as the primary one when passing the course "Reinforced Concrete Structures".



Keywords: building structures; reinforced concrete structures; design and calculation of reinforced concrete structures; reinforced concrete; theory of resistance of reinforced concrete structures

For citation: Anpilov S.M. Review of the textbook: Selyaev V.P., Utkina V.N. "Basics of calculation and design of reinforced concrete structures" part 1 "Basics of calculation of reinforced concrete structures" // Expert: theory and practice. 2025. № 4 (31). Pp. 140-141. (In Russ.). doi:10.51608/26867818_2025_4_140.

В учебнике рассмотрены способы изготовления железобетонных конструкций.

Во второй главе описаны прочностные и деформативные свойства цементного бетона и стальной арматуры, рассмотрены условия, при выполнении которых создается материал – железобетон, свойства которого по целому ряду показателей превосходят свойства бетона и арматуры.

В третьей главе рассмотрены основные принципы создания теории сопротивления железобетонных конструкций силовым воздействиям.

В четвертой главе рассмотрены методы создания конструкций с предварительно напряженной арматурой.

В шести последующих главах рассмотрены: особенности расчёта и проектирования железобетонных конструкций, работающих на сжатие, растяжение, изгиб; методы расчёта по предельным состояниям первой и второй группы.

В учебнике отражены новые нормативные документы, позволяющие повысить надежность строительных конструкций.

Изложение материала отличается: доходчивостью и краткостью, применением рисунков и расчётных схем, доступных для понимания.

Считаю целесообразным рекомендовать учебник «Основы расчёта железобетонных конструкций» в качестве основного при прохождении курса «Железобетонные конструкции».

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.08.2025; одобрена после рецензирования 17.09.2025; принята к публикации 17.09.2025.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 01.08.2025; approved after reviewing 17.09.2025; accepted for publication 17.09.2025.

УШЕЛ ИЗ ЖИЗНИ ВЫДАЮЩИЙСЯ УЧЕНЫЙ В ОБЛАСТИ СТРОИТЕЛЬНЫХ НАУК НИКОЛАЙ ИВАНОВИЧ КАРПЕНКО



(21.05.1936 – 26.09.2025)

26 сентября 2025 года ушел из жизни академик-секретарь отделения строительных наук РААСН, доктор технических наук, профессор Николай Иванович Карпенко. Его уход стал невосполнимой утратой для российской и мировой науки, а также для всего строительного сообщества.

Николай Иванович был не просто ученым, а настоящим визионером, чьи идеи и разработки кардинально изменили подходы к проектированию и строительству. Его многолетняя плодотворная деятельность на посту заведующего лабораторией «Проблемы прочности и качества в строительстве» НИИСФ РААСН стала ярким примером преданности своему делу и стремления к совершенству.

За свою долгую и насыщенную карьеру, охватившую 62 года, Николай Иванович внес неоценимый вклад в развитие теории расчета железобетонных конструкций. Его новаторские методы, учитывающие физическую нелинейность и трещинообразование, стали основой для создания самых современных и уникальных сооружений. Благодаря его трудам были разработаны новые подходы к расчету зданий из монолитного железобетона, которые нашли отражение в ключевых нормативных документах, таких как Свод правил СП 63.13330.2012.

Под его научным руководством выросли десятки высококвалифицированных специалистов, защитивших докторские и кандидатские диссертации. Более двухсот научных статей и три монографии, опубликованные Николаем Ивановичем, стали ценным наследием для будущих поколений инженеров и исследователей.

Николай Иванович Карпенко был не только выдающимся ученым, но и человеком, чьи заслуги были высоко оценены государством. Он дважды становился лауреатом премии Правительства РФ в области науки и техники, был кавалером Ордена Дружбы, носил почетные звания «Заслуженный деятель науки РФ», «Почетный строитель Москвы» и «Заслуженный строитель РФ».

Его уход – это большая потеря для всех, кто знал и уважал Николая Ивановича. Мы будем помнить его как блестящего ученого, мудрого наставника и человека, чья страсть к науке и строительству оставила неизгладимый след в истории.

Светлая память о Николае Ивановиче Карпенко навсегда сохранится в наших сердцах¹.

Редакционный совет, редакционная коллегия, сетевого научно-практического издания «Эксперт: теория и практика» с глубокой скорбью выражает искренние соболезнования родным и близким Николая Ивановича. Мы разделяем Вашу боль в этот трудный час и помним его вклад в нашу отрасль.

¹ Фото, текст, сайт РААСН, открытый доступ, URL: <https://raasn.ru/news/7121> (дата обращения 26.09.2025)



**NIKOLAI IVANOVICH KARPENKO, AN OUTSTANDING SCIENTIST IN THE FIELD OF CONSTRUCTION SCIENCES,
HAS PASSED AWAY**

On September 26, 2025, the academician-secretary of the Department of Construction Sciences of RAACS, a doctor of technical sciences, Professor Nikolay Ivanovich Karpenko, passed away. His death became an irretrievable loss for Russian and world science, as well as for the entire construction community.

Nikolay Ivanovich was not just a scientist but a real visionary whose ideas and developments radically changed the approaches to design and construction. His many years of fruitful activity as head of the laboratory "Problems of Strength and Quality in Construction" NIISF RAACS was a vivid example of dedication to its work and pursuit of excellence.

His death is a great loss for all who knew and respected Nikolai Ivanovich. We will remember him as a brilliant scientist, a wise mentor, and a man whose passion for science and construction has left an indelible mark on history.

The blessed memory of Nikolay Ivanovich Karpenko will forever be in our hearts.

The editorial board and editorial panel of the online scientific and practical publication "Expert: Theory and Practice" with deep sorrow express sincere condolences to relatives and friends of Nikolai Ivanovich. We share your pain in this difficult hour and remember his contribution to our industry.

УСЛОВИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ МАТЕРИАЛОВ

АВТОРАМ

Автор(ы), самостоятельно направляя научную статью, принимают на себя следующие обязательства: передают редакции сетевого издания «ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА» неисключительные права на использование научной статьи путем ее воспроизведения, использования научной статьи целиком или фрагментарно в сочетании с любым текстом, фотографиями или рисунками, в том числе, путем размещения полнотекстовых сетевых версий номеров на интернет-сайте издания.

Автор(ы) несет (ут) ответственность за неправомерное использование в научной статье объектов интеллектуальной собственности, объектов авторского права или «ноу-хау» в полном объеме в соответствии с действующим законодательством РФ.

Автор(ы) подтверждает (ют), что, направляемая статья публикуется впервые и не направлена в другое издание.

Автор(ы) согласен (ы) на обработку в соответствии со ст.6 Федерального закона «О персональных данных» от 27.07.2006 г. №152-ФЗ своих персональных данных, а именно: фамилия, имя, отчество, ученая степень, ученое звание, должность, место(а) работы и/или обучения, контактная информация по месту работы и/или обучения, в целях опубликования представленной статьи в сетевом издании.

Автор(ы) подтверждает (ют), что направляемая научная статья не содержит сведений или информации с ограниченным доступом и для ее публикации не требуется разрешение Минобрнауки или других министерств и ведомств.

Автор(ы) научной статьи ознакомлен (ы) и согласен (ы) со следующими условиями:

- авторские права на научную статью принадлежат автору(ам) данной статьи;
- авторские права на номер сетевого издания (в целом) принадлежат учредителю сетевого издания;
- редакция сетевого издания имеет право предоставлять материалы научных статей в российские и зарубежные организации, обеспечивающие индексы научного цитирования;
- редакция сетевого издания имеет право производить необходимые уточнения и сокращения;
- вознаграждение (гонорар) за опубликованные статьи не выплачивается, материалы научных статей, направляемые в редакцию, авторам не возвращаются.

При этом авторы имеют право использовать все материалы в их последующих публикациях при условии, что будет сделана ссылка на публикацию в нашем сетевом издании.

Если при верстке в **ИнДизайне** или загрузке в **РИНЦ** (*они видят всё*) у вас в статье будет обнаружено замена однотипных букв из разных алфавитов, вставлены слова в виде формул или применены в словах некорректные символы с целью увеличения оригинальности текста (к сожалению Word и Антиплагиат этого не видят) – статья будет **удалена**, а вся информация будет передана вашей организации.

*Редакция сетевого издания
«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»*



ТРЕБОВАНИЯ К ПУБЛИКАЦИЯМ В ЖУРНАЛЕ

«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»

(включен в категорию **K2 перечня ВАК**, пятилетний импакт-фактор в РИНЦ – 0,736)

Сайт: <https://www.expert763.ru/>

Научные специальности:

- 2.1.1. – Строительные конструкции, здания и сооружения (технические науки);
- 2.1.5. – Строительные материалы и изделия (технические науки);
- 2.1.9. – Строительная механика (технические науки);
- 1.1.8. - Механика деформируемого твердого тела (технические и естественные науки);

Размещение статей в сетевом издании платное.

Оплата производится после получения вами **сообщения** о приеме статьи к публикации, после чего автором высылается скриншот или фото оплаты через Сбербанк-онлайн или через другие банки-онлайн на адрес сетевого издания: expert763@mail.ru

Статью высылать по адресу: expert763@mail.ru

Материалы авторов (соавторов) не имеющих персональной регистрации в БД РИНЦ (SPIN-код, AuthorID) редакцией не рассматриваются, за исключением: если соавтором является доктор наук по специальности ВАК сетевого издания «Эксперт: теория и практика».

Редакция вправе отказать в размещении материалов автору, имеющему низкие наукометрические показатели в БД РИНЦ.

Структурные параметры:

Статья обязательно должна иметь элементы, отвечающие следующим параметрам:

1. Метаданные статьи на русском и английском языках (научная специальность, УДК, DOI, название статьи, знак копирайта (авторского права), **все научные идентификаторы автора**, ФИО автора полностью, должность, организация, адрес организации, личная электронная почта, аннотация и ключевые слова) – **не проверяются на антиплагиат.**

2. Тело статьи:

ВВЕДЕНИЕ

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами

(кратко описывается проблема исследования и значение ее решения)

Анализ последних исследований и публикаций, в которых рассматривались аспекты этой проблемы и на которых обосновывается автор; выделение неразрешенных 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 раздельной 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
№ 4 (31) 2025 г.

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

Scientific and Practical Online Edition

EXPERT: THEORY AND PRACTICE
№ 4 (31) 2025

Editor-in-Chief - Murashkin Vasily Gennadievich,
Candidate 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> 23.12.2025.
Формат 60x84/8. Усл.-печ. л. 17,2.
Электронные текстовые данные (8,63 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.

