

e-ISSN: 2782-7445

p-ISSN: 2686-7818

# ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА

2024, №4 (27)

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.

**e-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 Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), предоставлен свободный доступ к полнотекстовым материалам в базах данных: НЭБ eLIBRARY.ru, НЭБ КиберЛенинка.



©2024 Контент доступен по лицензии CC BY-NC 4.0

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

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

**Редакционный совет:**

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

*КАПРИЕЛОВ Семен Суренович* – академик РААСН, доктор технических наук, профессор, Российская академия Архитектуры и строительных наук (Москва, Россия)  
*ЛЯХОВИЧ Леонид Семенович* – академик РААСН, Заслуженный деятель науки и техники РФ, Почетный строитель, доктор технических наук, профессор, Томский государственный архитектурно-строительный университет  
*ЛЯЧЕНКОВ Николай Васильевич* – лауреат Государственной премии Совета министров СССР, Почетный гражданин г.о. Тольятти, действительный член Российской Академии естественных наук, член-корреспондент Международной инженерной академии, доктор технических наук, профессор, эксперт, АНО ИССТЭ (Тольятти, Россия)  
*МАИЛЯН Левон Рафаэлович* – академик РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автомобильных дорог, Донской 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 технического наук, доцент, ректор Белорусского Национального технического университета (Республика Беларусь, Минск)

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

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

Published since 2019. Published 4 times a year.  
**e-ISSN: 2782-74445; 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



© 2024 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, Baishiev University (Aktobe, Kazakhstan)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

#### **Редакционная коллегия:**

*МУРАШКИН Василий Геннадьевич* – главный редактор, 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 Никонович* – заместитель главного редактора, Почетный строитель, кандидат экономических наук, доктор философских наук; директор, профессор кафедры судебной экспертизы АНО ИССТЭ (Тольятти, Россия)

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

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

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

*ВЕДЯКОВ Иван Иванович* – 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

*КОРОСТЕЛЕВ Александр Алексеевич* – доктор педагогических наук, доцент, профессор кафедры информатики, прикладной математики и методики их преподавания, Поволжский государственный университет сервиса (Тольятти, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

*СОЛУЯНОВ Юрий Иванович* – доктор 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

*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., CIRD of the Ministry of Construction and Housing and Communal Services of the Russian Federation (Vladivostok, RF)

*Ivan I. VEDYAKOV* – 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 Turgenyev (Oryol, Russia)

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

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

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

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

*Alexander A. KOROSTELEV* – Dr. of Pedagogical Sciences, Associate Professor, Prof. of the Department of Informatics, Applied

Mathematics and Methods of Their Teaching, Volga Region State University of Service (Togliatti, Russia)

*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)

*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*

80 лет академику Селяеву Владимиру Павловичу .....	12
--	----

## **ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ. СТРОИТЕЛЬСТВО И АРХИТЕКТУРА**

<b>ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОТОННАЖНЫХ ЗАПАСОВ ТЕХНОГЕННОГО И НЕКОНДИЦИОННОГО СЫРЬЯ СИБИРИ В ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> ВЕРЕЩАГИН Владимир Иванович, РООТ Людмила Олеговна, БАРАНОВА Галина Павловна .....	15
<b>ПЕРКОЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ</b> ВОЛКОВА Светлана Николаевна .....	21
<b>ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫХ КОНСТАНТ ПО ПРЯМОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И КОНТРОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ДЛЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ</b> ЕРОФЕЕВ Александр Владимирович, МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович, ЕЗЕРСКИЙ Валерий Александрович, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, КАЗЬМИН Владислав Александрович .....	25
<b>АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ НЕСУЩИХ РЕБЕР КРУПНОРАЗМЕРНЫХ СОВМЕЩЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ДЕРЕВЯННОМ КАРКАСЕ</b> ЖАДАНОВ Виктор Иванович, НЕСТЕРЕНКО Максим Алексеевич, ПИНАЙКИН Игорь Петрович .....	31
<b>ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ</b> ЗАЙЧЕНКО Николай Михайлович, МАИЛЯН Левон Рафаэлович .....	37
<b>ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ</b> ЛАНКИНА Юлия Алексеевна, НИЗИНА Татьяна Анатольевна .....	44
<b>МОДЕЛЬ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА "МИКРО/НАНО-ГИБРИДНАЯ ГИДРОФОБНАЯ ЭМУЛЬСИЯ" И РАЗРАБОТКА НА ЕГО ОСНОВЕ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОРСКОГО БЕТОНА</b> ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, САДОВСКАЯ Елена Александровна, КИМ Лев Владимирович, ШАЛЫЙ Евгений Евгеньевич, ПИЧИ Чао, ДОНГ Бинг, ЧЕН Лидиг .....	50
<b>ПРИМЕНЕНИЕ АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ДЕМОКРАТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ КОНГО</b> МАКАЯ Лионель Мавунгу, АНДРИАНОВ Константин Анатольевич, ЗУБКОВ Анатолий Федорович, МОНАСТЫРЕВ Павел Владиславович .....	63
<b>РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕРКИ ПРОЧНОСТИ В ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ-ОБОЛОЧКИ ПЕРЕКРЫТИЯ</b> МИРСАЯПОВ Илшат Талгатович, СЕЛИВАНОВ Антон Валерьевич, РЕГЕР Федор Федорович .....	70
<b>РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНО-ДИАТОМИТОВЫХ ВЯЖУЩИХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ</b> МИТРОШИН Игорь Александрович .....	75

<b>КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ УМЕРЕННОГО, СУБТРОПИЧЕСКОГО, ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО И АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТОВ</b> НИЗИНА Татьяна Анатольевна, ЧИБУЛАЕВ Игорь Александрович, НИЗИН Дмитрий Рудольфович, СПИРИН Илья Петрович, ПИВКИН Николай Андреевич .....	80
<b>ПОВЫШЕНИЕ СВЕТОПРОПУСКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕЛИГНИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПРОПИТКЕ РАСТИТЕЛЬНЫМ МАСЛОМ</b> ПИЧУГИН Анатолий Петрович, ТКАЧЕНКО Сергей Евгеньевич, СМИРНОВА Ольга Евгеньевна.....	88
<b>МОДЕЛЬ БЕТОННОЙ СИСТЕМЫ С ВНУТРЕННЕЙ ГИДРОФОБНОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЕЙ И СУПЕРГИДРОФОБНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ С ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ</b> САДОВСКАЯ Елена Александровна, ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, КИМ Лев Владимирович, ШАЛЫЙ Евгений Евгеньевич, ПИЧИ Чао, ДОНГ Бинг, ЧЕН Лидиг.....	93
<b>ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНЫХ МИКРОКРЕМНЕЗЕМОВ</b> СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна .....	100
<b>ВЗАИМОСВЯЗЬ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЯТИСЛОЙНОЙ ПЛИТЕ ИЗ ДПК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ШАГА ЛАМЕЛЕЙ В ПОПЕРЕЧНЫХ СЛОЯХ</b> ТРОШИН Михаил Юрьевич, КОРОБКО Андрей Викторович.....	105

### ***МЕХАНИКА ДЕФОРМИРУЕМОГО ТВЕРДОГО ТЕЛА***

<b>ЗАДАЧА О КРАЕВОЙ ТРЕЩИНЕ В ПОЛУПЛОСКОСТИ</b> ПЕРОВА Ольга Сергеевна, ЛАВИТ Игорь Михайлович.....	110
<b>ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОГО ТЕЛА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ</b> ПЕРОВА Ольга Сергеевна, ЛАВИТ Игорь Михайлович.....	115

### ***МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ***

<b>НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ О ПРОВЕДЕНИИ XXV МЕЖДУНАРОДНОЙ НТК «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ»</b> ТРЕЩЕВ Александр Анатольевич, СЕЛЯЕВ Владимир Павлович, ПЕТРОВ Владилен Васильевич, АНПИЛОВ Сергей Михайлович, РИМШИН Владимир Иванович, ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич .....	120
<i>Условия размещения материалов .....</i>	127

# CONTENT

---

## *PERSONALITIES*

<b>ACADEMICIAN SELYAYEV VLADIMIR PAVLOVICH'S 80<sup>TH</sup> ANNIVERSARY .....</b>	<b>12</b>
--	-----------

## *TECHNICAL SCIENCES. BUILDING AND ARCHITECTURE*

<b>PROMISING AREA OF USING LARGE-TONNAGE RESERVES OF TECHNOGENIC AND SUBSTANDARD SIBERIAN RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS</b>	
VERESHCHAGIN Vladimir Ivanovich, ROOT Lyudmila Olegovna, BARANOVA Galina Pavlovna.....	15
<b>PERCOLATION MODEL OF DEGRADATION OF COMPOSITE MATERIALS</b>	
VOLKOVA Svetlana Nikolaevna .....	21
<b>VERIFICATION OF THE ADEQUACY OF THE METHOD FOR DETERMINING THERMAL FLUCTUATION CONSTANTS BY DIRECT TEMPERATURE AND REFERENCE POINT FOR WOODEN STRUCTURES</b>	
YEROFEYEV Alexander Vladimirovich, MONASTYREV Pavel Vladislavovich, YEZERSKY Valery Alexandrovich, ANPILOV Sergey Mikhailovich, KAZMIN Vladislav Alexandrovich.....	25
<b>ANALYSIS OF STRUCTURAL SOLUTIONS OF BEARING RIBS OF LARGE-SIZED COMBINED PANELS ON A WOODEN FRAME</b>	
ZHADANOV Viktor Ivanovich, NESTERENKO Maxim Alekseevich, PINAYKIN Igor Petrovich.....	31
<b>INNOVATION TECHNOLOGIES OF CONSTRUCTION OBJECTS INSTALLATION</b>	
ZAICHENKO Nikolay Mikhailovich, MAILYAN Levon Rafaelovich.....	37
<b>PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FILLED FUNCTIONAL-GRADIENT EPOXY COMPOSITES IN ROAD CONSTRUCTION</b>	
LANKINA Yulia Alekseevna, NIZINA Tatiana Anatolyevna.....	44
<b>MODEL OF SPECIAL MATERIAL "MICRO/NANO HYBRID HYDROPHOBIC EMULSION" AND DEVELOPMENT OF PROTECTIVE MATERIALS FOR MARINE CONCRETES BASED ON IT</b>	
LEONOVICH Sergei Nikolaevich, ANPILOV Sergey Mikhailovich, SADOVSKAYA Elena Alexandrovna, KIM Lev Vladimirovich, SHALY Evgeniy Evgenievich, PIGI Chao, DONG Bing, CHEN Liang .....	50
<b>THE USE OF ASPHALT-GRANULOCRETE MIXTURES FOR THE CONSTRUCTION AND REPAIR OF AUTOMOBILE ROADS IN THE DEMOCRATIC REPUBLIC OF THE CONGO</b>	
MAKAYA Lionel Mavungu, ANDRIANOV Konstantin Anatolyevich, ZUBKOV Anatoly Fedorovich, MONASTYREV Pavel Vladislavovich .....	63
<b>DEVELOPMENT OF A TESTING METHOD OF THE STRENGTH IN TRANSVERSE DIRECTION OF REINFORCED CONCRETE SHELL SLAB</b>	
MIRSAYAPOV Ilshat Talgatovich, SELIVANOV Anton Valerievich, REGER Fedor Fedorovich .....	70
<b>DEVELOPMENT OF METHODS FOR CONTROLLING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF STRUCTURE FORMATION OF CONCRETE BASED ON CEMENT-DIATOMITE BINDERS BY ACOUSTIC EMISSION METHOD</b>	
MITROSHIN Igor Alexandrovich .....	75

<b>COMPREHENSIVE ANALYSIS OF QUANTITATIVE VALUES OF METEOROLOGICAL FACTORS FOR TEMPERATE, SUBTROPICAL, EXTREMELY COLD AND ARCTIC CLIMATES</b> NIZINA Tatiana Anatolyevna, CHIBULAEV Igor Alexandrovich, NIZIN Dmitry Rudolfovich, SPIRIN Ilya Petrovich, PIVKIN Nikolai Andreevich.....	80
<b>INCREASED LIGHT TRANSMISSION CAPACITY DELIGNIFIED WOOD WHEN IMPREGNATED WITH VEGETABLE OIL</b> PICHUGIN Anatoly Petrovich, TKACHENKO Sergey Evgenievich, SMIRNOVA Olga Evgenievna.....	88
<b>MODEL OF A CONCRETE SYSTEM WITH INTERNAL HYDROPHOBIC FUNCTIONALIZATION AND SUPERHYDROPHOBIC COATINGS WITH LONG-TERM STABILITY</b> SADOVSKAYA Elena Alexandrovna, LEONOVICH Sergei Nikolaevich, ANPILOV Sergey Mikhailovich, KIM Lev Vladimirovich, SHALY Evgeniy Evgenievich, PIGI Chao, DONG Bing, CHEN Liang .....	93
<b>STUDY OF THE STRUCTURE OF DISPERSED MICROSILICA</b> SELYAEV Vladimir Pavlovich, KUPRIYASHKINA Lyudmila Ivanovna.....	100
<b>RELATIONSHIP BETWEEN THE MAXIMUM DEFLECTION AND NATURAL VIBRATION FREQUENCY IN A FIVE-LAYER CLT PANEL WITH CHANGING THE PITCH OF LAMELLAE IN TRANSVERSE LAYERS</b> TROSHIN Mikhail Yuryevich, KOROBKO Andrey Viktorovich .....	105

### ***MECHANICS OF A DEFORMABLE SOLID BODY***

<b>THE PROBLEM OF AN EDGE CRACK IN A HALF-PLANE</b> PEROVA Olga Sergeevna, LAVIT Igor Mikhailovich.....	110
<b>ON THE STABILITY OF DEFORMATION OF AN ELASTIC BODY UNDER QUASI-STATIC LOADING</b> PEROVA Olga Sergeevna, LAVIT Igor Mikhailovich.....	115

### ***CONFERENCE MATERIALS***

<b>SCIENTIFIC REPORT ON THE XXV INTERNATIONAL STC "ACTUAL PROBLEMS OF CONSTRUCTION AND CONSTRUCTION INDUSTRY"</b> TRESHCHEV Alexander Anatolyevich, SELYAEV Vladimir Pavlovich, PETROV Vladilen Vasilyevich, ANPILOV Sergey Mikhailovich, RIMSHIN Vladimir Ivanovich, TELICHKO Viktor Grigoryevich .....	120
<i>Conditions for posting materials</i> .....	127

## ПЕРСОНАЛИИ

---



**80 ЛЕТ АКАДЕМИКУ  
СЕЛЯЕВУ ВЛАДИМИРУ ПАВЛОВИЧУ**



Владимир Павлович Селяев родился 21 ноября 1944 г. в п. Барашево Зубово-Полянского района Мордовской АССР (ныне Теньгушевский район Республики Мордовия).

Вся трудовая деятельность Селяева Владимира Павловича связана с Мордовским государственным университетом, после окончания которого в 1967 году с красным дипломом он прошел путь от кандидата



(1973 г.) и доктора технических наук (1985 г.) до член-корреспондента (1994 г.) и действительного члена Российской академии архитектуры и строительных наук (2010 г.). Селяев В.П. возглавлял строительный факультет (1976-1978, 1981-1989 гг.), был проректором по учебной (1989-1992 гг.) и научной работе (1992-1997 гг.), с 1986 года по настоящее время руководит кафедрой строительных конструкций.

Селяев В.П. – автор более 750 научных и учебно-методических работ, в том числе более двадцати научных монографий, почти двухсот авторских свидетельств и патентов на изобретения. Под его научным руководством защищено более 30 докторских и кандидатских диссертаций.

Под руководством Владимира Павловича была создана и активно развивается научная школа, занимающаяся оценкой и прогнозированием долговечности строительных материалов, изделий и конструкций. Основные научные достижения Владимира Павловича и его учеников связаны, в первую очередь, с обоснованием теории химического сопротивления строительных материалов и конструкций, работающих при совместном действии силовых факторов и жидких агрессивных сред. Разносторонность его научных интересов растет с каждым годом – к традиционным областям его интересов добавились исследования, связанные с разработкой подходов к наномодификации строительных композитов и выявлением критериев, позволяющих оценить процесс разрушения бетонов. Им обоснован механизм дискретно-непрерывного (квантового) характера разрушения фрактальных структур композиционных материалов, что позволило объяснить физическую сущность повышения прочности (до 200 МПа) цементных композитов.

Под его руководством выполнены инновационные разработки: предложен способ синтеза аморфного мелкозернистого микрокремнезема из опал-кристобалитовых биоморфных пород; предложены проектные решения ограждающих конструкций с применением панелей VIP, теплопроводность которых варьируется в пределах 0,002-0,02 Вт/м<sup>2</sup>С.

Владимир Павлович – активный ученый, много выступает с научными докладами на международных и всероссийских конференциях и симпозиумах, является бессменным руководителем проводимой в Мордовском университете на регулярной основе Всероссийской научно-технической конференции «Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций». Является членом диссертационных советов в Казанском государственном архитектурно-строительном университете и Пензенском государственном университете архитектуры и строительства.

Научная, организационная и педагогическая деятельность Владимира Павловича отмечена многими федеральными и республиканскими наградами: знаком ЦК ВЛКСМ (1983 г.), золотой медалью ВДНХ СССР (1986 г.), знаком «Ударник одиннадцатой пятилетки» (1986 г.), орденом Трудового Красного Знамени (1986 г.), почетными грамотами Правительства Республики Мордовия (2000, 2014 гг.), орденом Русской Православной Церкви святого благоверного князя Даниила Московского III степени (2006 г.), грамотой РААСН (2007 г.), медалью «За заслуги. В ознаменование 1000-летия единения мордовского народа с народами Российского государства» (2012 г.); Орденом союза строителей РФ «За заслуги в строительстве» (2014 г.); орденом Славы III степени (2019 г.). Имеет благодарности Главы Республики Мордовия (1997, 2006, 2010 гг.); является лауреатом премии Комсомола Мордовии в области производства (1983 г.), Государственной премии Республики Мордовия (1999, 2006 гг.), премии Главы Республики Мордовия (2005, 2014 гг.), Почетное звание «Заслуженный деятель науки РМ», Почетный знак Главы Республики Мордовия «За личный вклад в развитие Республики Мордовия» (2024 г.).

Редакционный Совет, редакционная коллегия, редакция сетевого издания «Эксперт: теория и практика», коллеги и ученики от души поздравляют действительного члена Российской академии архитектуры и строительных наук, заслуженного деятеля науки Российской Федерации, доктора технических наук, профессора, заведующего кафедрой строительных конструкций Национального исследовательского Мордовского государственного университета им. Н.П. Огарёва глубокоуважаемого Владимира Павловича Селяева с замечательным юбилеем. Желаем юбиляру крепкого здоровья, неиссякаемой энергии, долгих творческих лет, талантливых и благодарных учеников, новых значимых успехов в науке и подготовке инженерных кадров для строительной индустрии России! Уверены, что безграничная харизма и широкая улыбка всегда будут при Вас!

*С уважением,  
редакционный совет, редакционная коллегия  
сетевого научно-практического издания  
«ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА»*



**ACADEMICIAN SELYAYEV VLADIMIR PAVLOVICH'S  
80<sup>TH</sup> ANNIVERSARY**

Vladimir Pavlovich Selyaev was born on November 21, 1944, in the village of BarasevoZubovo-Poliansky district of Mordovia ASSR (now Tengushevsk district of the Republic of Mordovia).

All the work activities of Selyaev Vladimir Pavlovich are connected with Mordovian State University. He graduated it with honors in 1967. After this, he became a candidate in 1973 and a doctor of technical sciences in 1985. He became a member-correspondent in 1994 and a full member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences in 2010. Selyaev V.P. headed the construction faculty (1976-1978, 1981-1989), was a vice-rector of education (1989-1992) and scientific work (1992-1997). From 1986 to the present day, he heads the department of construction structures.

Selyaev V.P. is the author of over than 750 scientific and educational works, including more than twenty scientific monographs, almost two hundred copyright certificates and patents on inventions. More than 30 doctoral and candidate theses were protected under his scientific guidance.

The editorial board, editorial panel, editorial office of the online publication "Expert: theory and practice," colleagues and students, sincerely wish highly respected Vladimir Pavlovich Selyaev a happy anniversary. He is the standing member of the Russian Academy of Architecture and Construction Sciences, an honored worker of science of the Russian Federation, Doctor of Technical Sciences, professor, head of the Department of Construction Structures of the N.P. Ogarev Mordovia State University.

We wish the celebrant good health, endless energy, many creative years, talented and grateful students, and new significant achievements in science and engineering training for the Russian construction industry! We are sure that the unlimited charisma and a wide smile will always be with you!

*Respectfully,  
the Editorial Board and the Editorial Panel  
of the network scientific-practical journal  
"EXPERT: THEORY AND PRACTICE"*

Научная статья  
УДК 691.2  
ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура  
ВАК: Строительные материалы и изделия  
doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_15

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ МНОГОТОННАЖНЫХ ЗАПАСОВ ТЕХНОГЕННОГО И НЕКОНДИЦИОННОГО СЫРЬЯ СИБИРИ В ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Авторы 2024  
SPIN: 5380-7523  
ORCID: 0000-0002-6257-1066  
Scopus ID: 57202993448

**ВЕРЕЩАГИН Владимир Иванович**  
доктор технических наук, профессор  
*Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
(Россия, Томск, e-mail: vver@tpu.ru)*

SPIN: 7475-7990  
ORCID: 0000-0002-6898-5999  
Scopus ID: 52164362300

**РООТ Людмила Олеговна**  
кандидат технических наук  
*Национальный исследовательский  
Томский политехнический университет  
(Россия, Томск, e-mail: tolbanowa@tpu.ru)*

SPIN: 5991-4290

**БАРАНОВА Галина Павловна**  
кандидат технических наук, доцент  
*Сибирский федеральный университет  
(Россия, Красноярск, e-mail: putinap@mail.ru)*

**Аннотация.** Производство востребованных для современного строительства материалов и изделий на основе многотоннажных запасов некондиционного и техногенного силикатного сырья является актуальным. В статье приведены результаты анализа научных исследований и практического использования нефелиновых шламов Ачинского глиноземного комбината, цеолитсодержащих пород Сахаптинского месторождения Красноярского края и пироксеновых отходов обогащения рудных концентратов Качканарского ГОКа. Выделены перспективные направления использования рассмотренных видов силикатного сырья в производстве строительных материалов. Цеолитсодержащие породы эффективны при получении на их основе поодностадийной технологии пеностеклокристаллических материалов с насыпной плотностью 430–450 кг/м<sup>3</sup>, водопоглощением 3,5–3,8 %, прочностью при сжатии 6,0–6,4 МПа. При двустадийной технологии насыпная плотность составляла 330–350 кг/м<sup>3</sup>, а прочность – 4,3–4,6 МПа. Пироксеновые отвалы, представленные железосодержащими твердыми растворами диоксида, перспективно использовать в производствах стеновой керамики и облицовочной плитки. Использование нефелинового шлама Ачинского глиноземного комбината, наряду с действующим производством цементного клинкера, перспективно массовое производство стеновых пеносиликатных блоков автоклавного твердения.

**Ключевые слова:** цеолитсодержащая порода; диоксидовый отход добычи титановой руды; кальцийсодержащий шлам переработки нефелина; силикатные строительные материалы; некондиционное сырье

**Для цитирования:** Верещагин В.И., Роот Л.О., Баранова Г.П. Перспективные направления использования многотоннажных запасов техногенного и некондиционного сырья Сибири в технологии строительных материалов // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 15-20. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_15.



Original article

**PROMISING AREA OF USING LARGE-TONNAGE RESERVES OF TECHNOGENIC AND SUBSTANDARD SIBERIAN RAW MATERIALS IN THE TECHNOLOGY OF BUILDING MATERIALS**

© The Author(s) 2024

**VERESHCHAGIN Vladimir Ivanovich**

Dr. of Technical, Prof.  
National Research Tomsk Polytechnic University  
(Russia, Tomsk, e-mail: vver@tpu.ru)

**ROOT Lyudmila Olegovna**

Candidate of Technical Sciences  
National Research Tomsk Polytechnic University  
(Russia, Tomsk, e-mail: tolbanowa@tpu.ru)

**BARANOVA Galina Pavlovna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Siberian Federal University  
(Russia, Krasnoyarsk, e-mail: putinap@mail.ru)

**Abstract.** The production of materials and products for advanced construction industry based on large-tonnage reserves of substandard and silicate raw materials is relevant. The article presents the results of the analysis of scientific research and practical use of nepheline sludge of the Achinsk Alumina Refinery, zeolite-containing rocks of the Sakhaptynsky deposit in the Krasnoyarsk Region and pyroxene waste from the enrichment of titanium ore of the Kachkanarsky Mining and Processing Plant. Promising areas of use of the considered types of silicate raw materials in the production of building materials are highlighted. Zeolite-containing rocks are effective in obtaining foamed glass ceramic materials with a poured density of 430–450 kg/m<sup>3</sup>, water absorption of 3.5–3.8%, and compressive strength of 6.0–6.4 MPa using a single-stage technology. With a two-stage technology, the bulk density is 330–350 kg/m<sup>3</sup> and the strength is 4.3–4.6 MPa. Pyroxene wastes, represented by iron-containing solid solutions of diopside, are promising for use in the production of wall ceramics and facing tiles. Along with the current production of cement clinker based on nepheline sludge, mass production of autoclaved foam silicate wall blocks is promising.

**Keywords:** zeolite-containing rock; diopside waste from titanium ore mining; calcium-containing sludge from nepheline processing; silicate building materials; substandard raw material

**For citation:** Vereshchagin V.I., Root L.O., Baranova G.P. Promising area of using large-tonnage reserves of technogenic and substandard Siberian raw materials in the technology of building materials // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 15–20. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_15.

**Введение.** Использование накопленных многотоннажных запасов техногенного инекондиционного силикатного сырья в производстве строительных материалов отвечает приоритетным направлениям научно-технологического развития России в части «сохранение и рациональное использование природных ресурсов» (Указ Президента РФ от июня 2024 г. № 529).

Объектами исследования некондиционного и техногенного силикатного сырья являются: цеолитсодержащие породы Сахатинского месторождения более 10 млн. т. (Красноярский край, район г. Назарово), диопсидовые (пироксеновые) отходы добычи титановых руд Качканарского ГОКа около 40 млн. т. (Свердловская область) и кальцийсодержащие шламы переработки нефелиновых пород (Отвалы нефелинового шлама Ачинского глиноземного комбината более 100 млн. т.). Общим для этих видов сы-

рья является их большие запасы, доступность и большой задел научных исследований по их использованию.

Исследования цеолитсодержащих пород Сахатинского месторождения активно проводились в 1990-е гг по научно-технической программе «Цеолиты Сибири» [1-5], исследования ведутся и в настоящее время [6-7].

Применение железистых диопсидовых отходов обогащения флогопита Алданского месторождения и Качканарского титаномагнетитового месторождения в производстве строительных материалов различного назначения было исследовано в период 1980-1987 гг. Результаты исследований обобщены в 1991 г. В аналитическом обзоре Всесоюзного научно-исследовательского института научно-технической информации и экономики промышленности строительных материалов (ВНИИЭСМ) [8]. Матери-



алы исследований эффективного использования природных диоксидов при изготовлении силикатных материалов и изделий опубликованы в работах [9-16].

Перспективность использования нефелиновых шламов производства глинозема отражены в публикациях [17-19].

Целью данной работы является анализ результатов многолетних исследований авторов по разработке составов и технологий строительных материалов и изделий на основе рассматриваемого силикатного сырья и рекомендации по реализации изготовления наиболее эффективных и востребованных материалов.

**Результаты и обсуждение.** Цеолитсодержащая порода Сахатинского месторождения Красноярского края, по данным рентгенофазового анализа, представлена цеолитовыми минералами – гейландитом и клиноптилолитом, кварцем, плагиоклазами, глинистыми минералами (монтмориллонит) [3].

Порода содержит две разновидности: светло-коричневую и светло-зеленую. Химический состав разновидностей породы приведен в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав разновидностей цеолитсодержащей породы

	Содержание оксидов, мас. %								
	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Δm <sub>np.</sub>
C <sub>3</sub>	64,80	0,35	12,77	2,46	1,84	2,50	0,63	3,20	11,45
C <sub>к</sub>	66,01	0,34	12,51	2,36	1,66	2,27	1,04	3,24	10,28

C<sub>3</sub> – светло-зеленая разновидность

C<sub>к</sub> – светло-коричневая разновидность

Таблица 2. Свойства гранулированных пеностеклокристаллических материалов на основе алюмосиликатного сырья

Свойства	Пеностеклокристаллические материалы на основе алюмосиликатного сырья			Керамзит
	Цеолитовая порода*	Перлит	Золлошлак	
Плотность насыпная, кг/м <sup>3</sup>	330–350	220–250	350–370	300–800
Прочность (МПа) при сдавливании в цилиндре	4,3–4,6	2,8–3,1	4,5–4,8	0,6–4,5
Водопоглощение, %	4–7	2–3	5–7	8–20
Теплопроводность при 20 °С, Вт/м К	0,08–0,09	0,07–0,08	0,08–0,09	0,10–0,16

\* Порода Сахатинского месторождения

Гранулированный пеноцеолитовый материал, содержащий добавку кальцинированной соды, соответствует требованиям ГОСТ 9758–86 «Заполнители пористые неорганические для строительных работ». Наилучшие характеристики имеет гранулированный пеноматериал, состоящий из смеси цеолитсодержащей породы и 20% кальцинированной соды: насыпная плотность 450 кг/м<sup>3</sup>; водопоглощение 3,8%; прочность 6,4 МПа [4-5]. На основе цеолитсодержащей породы (90% мас.) получены грану-

лированные пеностеклокристаллические материалы. Технология предполагает получение гранулята при 900 °С, вспенивание измельченного гранулята при 820–850 °С. Сравнительные свойства материалов приведены в табл. 2.

На рис. 1 представлены сравнительные зависимости прочности гранулированных пеносиликатных материалов при раздавливании в цилиндре от насыпной плотности.

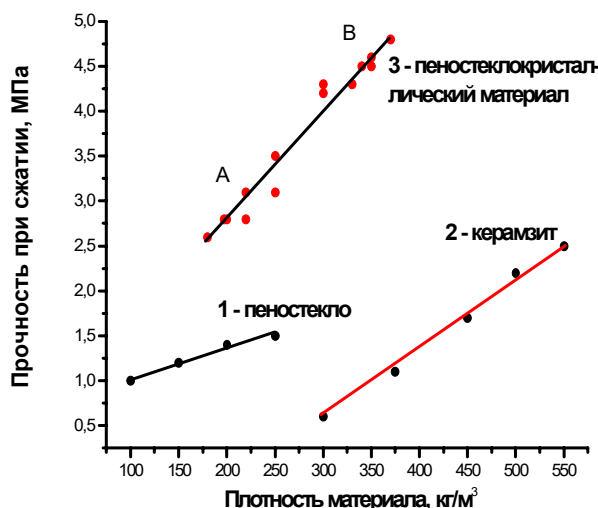


Рис. 1. Зависимости прочности пеносиликатных материалов от плотности:

1 – пеностекло, 2 – керамзит, 3 – пеностеклокристаллический материал; А – кремнеземистое сырье, В – алюмосиликатное сырье

Пеностеклокристаллический материал на основе цеолитсодержащей породы Сахатинского месторождения (алюмосиликатное сырье) по плотности соответствует легкому керамзиту, а по прочности превышает его в 3,0–3,5 раза

Сотрудниками института геологии и минералогии им. В. С. Соболева СО РАН были разработаны состав и технология изготовления блочного материала «Сибирфома» – пористого строительного материала из цеолитсодержащих пород [2]. Перспективным и востребованным в настоящее время является производство плит из вспененных гранул цеолитсодержащих пород Сахатинского месторождения для строительства северных дорог Сибири.

Из цеолитсодержащей породы данного месторождения полусухим прессованием с выгорающими добавками при температурах обжига 900–950 °С можно получать облегченный керамический кирпич плотностью 800–1000 кг/м<sup>3</sup> при прочности 10–15 МПа (марка 100–150).

Силикатные отходы Качканарского ГОКа по соотношению оксидов магния и кальция в химическом соотношении соответствуют диоксиду и твердым растворам на его основе (табл. 3).

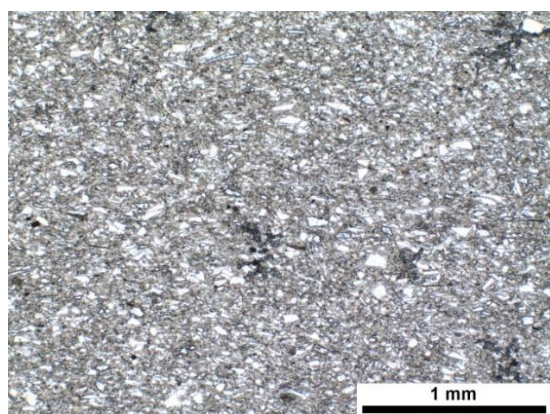


Таблица 3. Химический состав силикатных отходов Качканарского ГОКа

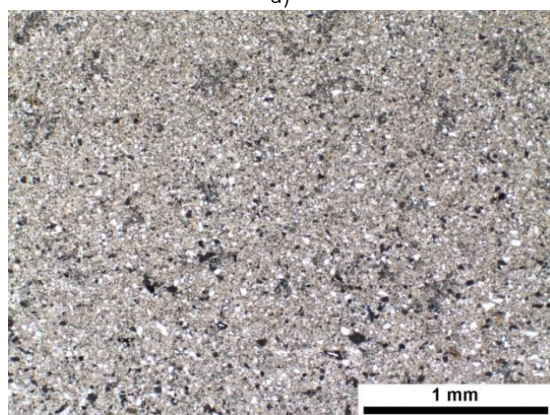
Содержание оксидов, мас. %								
SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O + K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
47,74- 49,63	0,80- 1,20	9,52- 10,11	7,00- 10,00	0,11- 0,12	11,00- 13,25	16,56- 18,01	1,20- 2,20	1,70- 2,40

Отходы Качканарского ГОКа представляют интерес для производства строительных материалов по следующим факторам: большой объем, усредненный состав, дисперсность, основной компонент – железистый диопсид активный при взаимодействии в твердой фазе с другими силикатными.

Добавки железосодержащего природного диопсида эффективны для повышения марки керамического кирпича на основе глин и суглинков [14], уменьшения усадки и повышения прочности керамической облицовочной плитки [8], повышения водостойкости магнезиальных вяжущих [9], а также в качестве активной дисперсной добавки в бетоны. На основе дисперсного диопсида (90±3%) получен безусадочный керамический материал обжигом пресовок при 1180 °С [10–13]. На рис. 2 представлены микрофотографии однородной структуры образцов безусадочной диопсидовой керамики.



а)

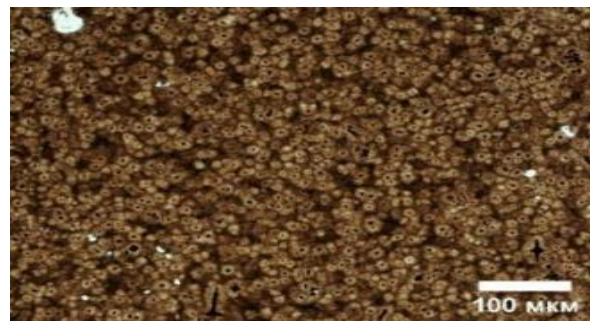


б)

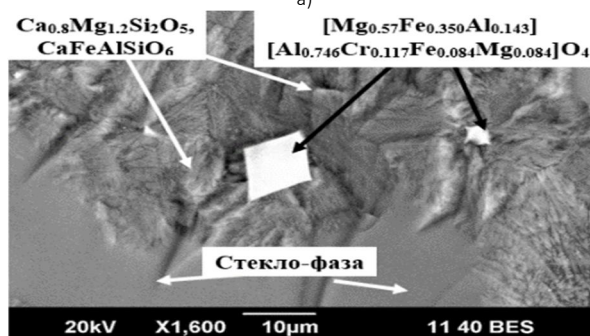
Рис. 2. Микрофотографии структуры керамики на основе дисперсного диопсида:

а) добавка жидкого стекла; б) добавка глины с жидким стеклом

Диопсидсодержащие отходы Качканарского ГОКа могут использоваться в качестве основного компонента для шпинелидпироксенового каменного литя повышенной прочности за счет сферолитовой структуры (рис. 3).



а)



б)

Рис. 3. Микрофотографии сферолитовой структуры каменного литя на основе отходов добычи титановой руды: а) × 160, б) × 1600

Одной из наиболее серьезных экологических проблем Ачинска (Красноярский край) является огромный шламовый отвал Ачинского глиноземного комбината (АГК), который за годы работы комбината сложился в протяженную искусственную возвышенность, в которой, по приблизительным оценкам, накопилось около 100 млн. тонн нефелинового шлама, которая постоянно прирастает по 4 млн. тонн в год. Химический состав шлама приведен в табл. 4.

Таблица 4. Химический состав нефелинового шлама Ачинского глиноземного комбината

Содержание оксидов, %мас.						
SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	Na <sub>2</sub> O	Δm <sub>лр.</sub>
27,8– 28,7	1,9–5,0	2,1–5,4	56,7– 58,5	1,9–2,1	1,2–3,0	1,8–5,6

По химическому составу нефелиновый шлам представлен в основном оксидами кальция и кремния при суммарном содержании 85–88%мас. При этом мольное отношение оксидов CaO:SiO<sub>2</sub> – 2:1 соответствует ортосиликату кальция. Другие оксиды представлены: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, (2,0–5,0% мас.), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>(2,0–5,5% мас.), MgO (2,0–2,2% мас.), Na<sub>2</sub>O(1,0–3,0% мас.). Потери при прокаливании составляют 1,8–5,6% мас.



Ортосиликат кальция  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  является одним из минералов цементного клинкера в форме белита, он является первичным продуктом синтеза при любом соотношении оксидов кальция и кремния в системе « $\text{CaO}\text{-SiO}_2$ ». Диаграмма состояния системы на рис. 4.

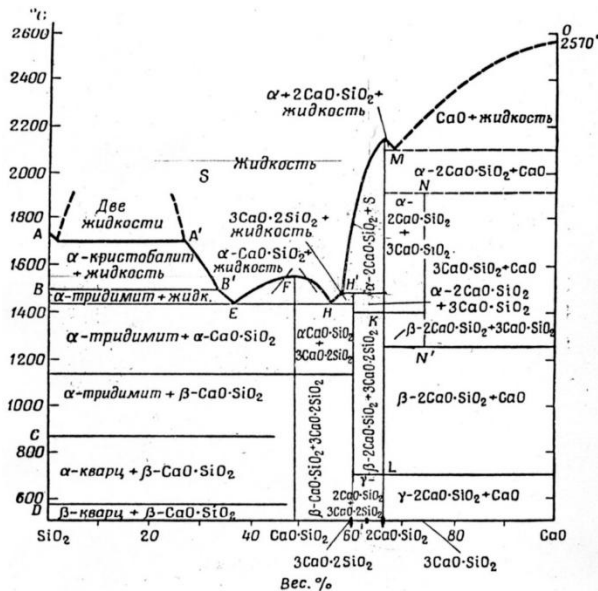


Рис. 4. Диаграмма состояния системы  $\text{CaO}\text{-SiO}_2$  (Rankin, Greig) [20]

Анализ положения  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  в системе оксидов (рис.4) показывает, что высокотемпературный обжиг смеси нефелинового шлама с известняком ( $\text{CaCO}_3$ ) и корректирующими добавками позволяет получать цементный клинкер с необходимым содержанием алита ( $3\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ), исключив стадию синтеза белита ( $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ). В настоящее время на АГК восстановлено производство цементного клинкера и цемента на его основе. При этом не исключена возможность добавлять при изготовлении кобинированного цемента шлам белитового состава вместо металлургического шлама. Автоклавная обработка пористых газосиликатных стеновых изделий потенциально обеспечивает достижение характеристик по прочности и плотности лучше характеристик изделий «СИБИТ». Добавки нефелинового шлама в шихту низкомарочного кирпича повышают его марочную прочность за счет синтеза волластонита ( $\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ) при взаимодействии с дисперсным кварцем гиньского сырья:  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + \text{SiO}_2 = 2(\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2)$ .

### Выводы

1. Цеолитсодержащие породы Сахатинского месторождения перспективны для производства высокопрочных гранулированных и блочных пеностеклокристаллических материалов для гражданского и дорожного строительства.
2. Дисперсные отходы железосодержащих твердых растворов диопсида эффективны для произ-

водства всех видов строительной керамики (кирпич, облицовочная плитка, черепица).

3. Белитсодержащие нефелиновые шламы наиболее эффективны для производства цементного клинкера и газосиликатных стеновых блоков повышенной прочности.

### Библиографический список

1. Овчаренко Г.И., Свиридов В.Л. Цеолиты в строительных материалах. Барнаул. Изд. АлтГТУ им И.И. Ползунова. 1995. –102 с.
2. Физико-химические свойства Сибирфома – пористого строительного материала из цеолитсодержащих пород / Л.К. Казанцева, И.А. Белицкий, Б.А. Фурсенко // Стекло и керамика. –1995. –№ 10. – С. 3-6.
3. Верещагин В.И., Смирнская В.Н., Филина С.В. Поиск и оценка физико-химических критериев, определяющих создание водостойких композиций цемента Сореля с силикатными добавками // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1994. – № 11. – С. 70-75.
4. Верещагин, В. И. Гранулированный пеностеклокристаллический теплоизоляционный материал из цеолитсодержащих пород / В. И. Верещагин, С. Н. Соколова // Строительные материалы. – 2007. – № 3. – С. 66-68. – EDN HZITJL.
5. Патент № 2272007 С1 Российская Федерация, МПК С03С 11/00. Шихта для производства пеноцеолита : № 2004127318/03 : заявл. 13.09.2004 : опубл. 20.03.2006 / В. И. Верещагин, С. Н. Соколова, Л. К. Казанцева ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Томский политехнический университет. – EDN IXZASA.
6. Васильевская, Н. Г. Смешанные вяжущие с цеолитсодержащей породой Сахатинского месторождения / Н. Г. Васильевская, С. В. Дружинкин // Строительные материалы. – 2007. – № 12. – С. 30-31. – EDN ICDIPX.
7. Патент № 2348588 С2 Российская Федерация, МПК С04В 28/02, С04В 14/04, С04В 111/20. сухая строительная смесь : № 2006135052/03 : заявл. 03.10.2006 : опубл. 10.03.2009 / Н. Г. Васильевская, В. И. Верещагин, С. В. Дружинкин ; заявитель Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Сибирский федеральный университет" (СФУ). – EDN RLGUYU.
8. Диопсидовые породы – универсальное сырьё для производства керамических и других силикатных материалов / В. И. Верещагин, Ю. И. Алексеев, В. М. Погребенков [и др.] // Керамическая промышленность. Сер. 5. Аналитический обзор. – Вып. 2. – М.: ВНИИЭСМ, 1990. – 60 с.
9. Композиционные магнезиально-диопсидовые вяжущие материалы из механически активированных диопсидов / В. Н. Зырянова, Г. И. Бердов, В. И. Верещагин, С. В. Эрдман // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 4(580). – С. 48-51. – EDN IBDVXV.
10. Керамические материалы на основе диопсида / В. И. Верещагин, В. К. Меньшикова, А. Е. Бурученко, Н. В. Могилевская // Стекло и керамика. – 2010. – № 11. – С. 13-16. – EDN NBKRMB.
11. Верещагин, В. И. Облицовочная строительная керамика на основе диопсида / В. И. Верещагин, А. Е. Бурученко, В. К. Меньшикова // Вестник Томского государ-



- ственного архитектурно-строительного университета. – 2011. – № 3(32). – С. 145-152. – EDN OEDUXZ.
12. Buruchenko, A. E. Low-Shrinkage Ceramic Based on Fine-Grained Dolomite Wastes from Crushed-Stone Production / A. E. Buruchenko, V. K. Men'shikova, V. I. Vereshchagin // *Glass and Ceramics*. – 2020. – Vol. 76, No. 11-12. – P. 415-418. – DOI 10.1007/s10717-020-00213-8. – EDN ZZYNOP.
13. Ceramic materials based on diopside / V. I. Vereshchagin, N. V. Mogilevskaya, V. K. Men'shikova, A. E. Buruchenko // *Glass and Ceramics*. – 2011. – Vol. 67, No. 11-12. – P. 343-346. – DOI 10.1007/s10717-011-9294-z. – EDN OHXSPR.
14. Сафонова, Т. В. Физико-химические процессы взаимодействия дисперсного диопсида с монтмориллонитом в полиминеральном глинистом сырье при обжиге / Т. В. Сафонова, В. И. Верещагин // *Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология*. – 2014. – Т. 57, № 8. – С. 52-56. – EDN TJWEEB.
15. Верещагин, В. И. Безусадочный облицовочный керамический материал на основе диопсидового сырья / В. И. Верещагин, А. Е. Бурученко, В. К. Меньшикова // *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 1-1. – С. 13. – EDN VIDTCB.
16. Горбачев Д. В., Верещагин В. И., Роот Л. О. Эффективная технология изготовления электротехнической керамики из маложелезистых диопсидовых пород // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2024. – Т. 335. – № 8. – С. 29–36. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4681
17. Комплексное использование нефелинового шлама в производстве строительных материалов / М. Л. Степанова, Н. А. Маркелов, М. Ш. Гафаров [и др.] // *Современные наукоемкие технологии*. – 2019. – № 3-1. – С. 77-82. – EDN ZLEZPF.
18. Мещеряков И. В. Применение нефелиновых шламов в дорожном строительстве // *Современные научные исследования и инновации*. – 2012. – № 10. – [Электронный ресурс]. URL: <https://web.snauka.ru/issues/2012/10/17755>
19. Нефелиновые концентраты и шламы - уникальное сырье для геополимерных материалов и конструкций / Б. В. Левин, Б. С. Лисюк, К. Л. Луценко [и др.] // *Мир дорог*. – 2020. – № 129-130. – С. 91-100. – EDN FWCAHQ.
20. Диаграммы состояния силикатных систем : справочник. В 3 вып. Вып. первый. Двойные системы / Н. А. Торопов, В. П. Барзаковский, В. В. Лапин [и др.]. – Л.: Наука, Ленингр. отд., 1969. – с. 38.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 14.10.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024; принята к публикации 02.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 14.10.2024; approved after reviewing 02.12.2024; accepted for publication 02.12.2024.



Научная статья

УДК 620.22(075)

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

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

2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_21

## ПЕРКОЛЯЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЕГРАДАЦИИ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

© Автор 2024

SPIN: 2654-6060

ORCID 0009-0005-4337-383X

**ВОЛКОВА Светлана Николаевна**

кандидат технических наук, доцент

*Российский государственный аграрный университет –*

*МСХА имени К.А. Тимирязева*

*(Россия, Москва, e-mail: , s.volkova@rgau-msha.ru)*

**Аннотация.** Проектирование эффективных композиционных строительных материалов, отличающихся высоким химическим сопротивлением и долговечностью является актуальной задачей современного строительного материаловедения. Метод деградационных функций позволяет с заданной надежностью оценивать деградацию строительных материалов и конструкций, эксплуатируемых в агрессивных средах и прогнозировать изменение их несущей способности и жесткости, что представляет практический интерес. Деградационные функции можно определить экспериментально и из анализа моделей деградации, показывающих распределение по площади поперечного сечения образца объема повреждений и механических свойств.

**Ключевые слова:** композиционные материалы; перколяционная модель; долговечность; деградация; деградационные функции; кластер; порог протекания; модели деградации

**Для цитирования:** Волкова С.Н. Перколяционная модель деградации композиционных материалов // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 21-24. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_21.

Original article

## PERCOLATION MODEL OF DEGRADATION OF COMPOSITE MATERIALS

© The Author 2024

**VOLKOVA Svetlana Nikolaevna**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor

*Russian State Agrarian University - Moscow Timiryazev*

*Agricultural Academy*

*(Russia, Moscow, e-mail: s.volkova@rgau-msha.ru)*

**Abstract.** Modern building materials science is tackling an urgent task of designing effective composite building materials with high chemical resistance and durability. The method of degradation functions allows estimating with a given reliability the degradation of building materials and structures used in aggressive environments and to predict the change in their bearing capacity and rigidity, which is of practical interest. Degradation functions can be determined experimentally and from the analysis of degradation models showing the distribution of damage volume and mechanical properties over the cross-sectional area of the sample.

**Keywords:** composite materials; percolation model; durability; degradation; degradation functions; cluster; percolation threshold; degradation models

**For citation:** Volkova S.N. Percolation model of degradation of composite materials // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 21-24. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_21.



Многообразие составов строительных композиционных материалов с различными эксплуатационными характеристиками и недостаточность опытных данных, полно и точно описывающих процессы деградации при использовании этих материалов под действием различных сред, температур, биоповреждений и других факторов являются значительным препятствием при разработке методик расчета надежности и долговечности конструкций из данных материалов, что, в свою очередь, в современных условиях является актуальной задачей.

В этой связи для оценки долговечности композиционных материалов целесообразно применять метод деградационных функций, выражающих изменение во времени несущей способности и жесткости строительных материалов и конструкций и учитывающий неравномерность распределения прочностных характеристик композиционного материала по высоте поперечного сечения под действием агрессивных сред. При этом важно определить модели, соответствующие механизму деградации.

Формирование структуры композиционных материалов – это сложный процесс перехода системы от беспорядка к порядку, который можно описать с позиций синергетического подхода и теории протекания (перколяции).

Следуя полиструктурной теории, разработанной академиком В.И. Соломатовым, можно считать, что формирование структуры идет на трех уровнях: микроуровне, мезоуровне и макроуровне. На микроуровне формирование структуры в полимерных композитах связано с образованием надмолекулярных объединений (глобул, фибрил) из молекул полимерных смол, отвердителей и пластификаторов. На мезоуровне в формировании структуры активно участвует тонкодисперсный наполнитель, из которого образуются кластеры. В данном контексте кластером будет называться совокупность частиц, образующаяся около активных центров структуры материала. Кластер растет за счет прилипания к нему отдельных частиц. На макроуровне отдельные кластеры, взаимодействуя через прослойки связующего, образуют макроструктуру композита в виде перколяционного кластера [1-2].

Предполагая, что все частицы сферические, одинакового размера и соприкосновение частиц или кластеров приводит к их объединению, а также учитывая диффузионное движение частиц в среде, диффузионное движение кластеров и их падение в среде под действием силы тяжести, число частиц в кластере  $n$  удовлетворяет уравнению:

$$\frac{dn}{dt} = v_0 + v_1, \quad (1)$$

где  $v_0$  – частота прилипания к кластеру частиц, совершающих броуновское движение,  $v_1$  – частота захвата кластером частиц в результате его падения в поле сил тяжести.

$$v_0 = k_0 N n^{1/F}, \quad v_1 = k_1 N n^{2/F},$$

где константа скорости  $k_0 = 2T/(3\eta)$  не зависит от материала и размера частиц,  $k_1 = 2\pi\rho g r_0^4 / 9\eta$ ,  $\rho$  – разность плотностей материала частиц и среды,  $r_0$  – радиус отдельной частицы,  $F$  – фрактальная размерность кластера,  $N$  – число частиц в единице объема,  $\eta$  – коэффициент вязкости;

Подставляя значения  $v_0$  и  $v_1$  в формулу (1), получаем выражение для времени роста кластера:

$$t = \frac{1}{N} \int \frac{dn}{k_0 n^{1/F} + k_1 n^{2/F}}.$$

Если учитывать только диффузионное движение частиц или кластеров, после ряда преобразований получим для времени роста перколяционного кластера выражение:

$$t = \frac{\pi}{N k_0^{1/F} \cdot k_1^{2/F} \cdot \sin(\pi/F)}.$$

Предполагая, что кластеры в композиционном материале образуют упорядоченные структурные системы, имитирующие кубическую или гексагональную упаковки, следует моделировать структурные системы в виде основных структурных элементов (кластеров) и связей. Кластеры воспринимают усилия и через связи перераспределяют их на смежные элементы. Передача усилия с кластера на кластер может происходить через прямые или транзитные связи.

Макроструктуру композита можно представить в виде объемной решетки, состоящей из узлов, прямых и транзитных связей, и в соответствии с синергетическим подходом структура материала будет тем совершеннее, чем выше порог протекания  $x_c$ . Если  $x_c = 1$ , то структура материала представляется в виде перколяционного (бесконечного) кластера, моделируемого объемной решеткой, у которой все связи и узлы находятся в рабочем состоянии. Если  $x_c$  немного отличается от единицы, то часть узлов выпадает из перколяционного кластера и возможно образование изолированных кластеров, а при некотором критическом значении  $x_c$  перколяционный кластер прекращает свое существование. Следует учитывать, что величина  $x_c$  зависит от типа решетки.

Порог протекания может быть найден из решения задачи узлов или задачи связей. В этих задачах случайными элементами соответственно являются узлы, которые с заданной долей вероятности могут как принадлежать, так и не принадлежать перколяционному кластеру или связи, которые также могут быть целыми или разорванными. Существует условие Хаммерсли:  $x_c \leq x_y$ . Если записать это неравенство иначе:  $1 - x_c \geq 1 - x_y$ , то становится ясно, что вырезая узлы заблокировать систему легче, чем разрушая связи. Это очевидно, т.к. при блокировании одного узла разрывается не одна связь, а все связи, входящие в этот узел.

Из анализа порогов протекания для всех решеток следует, что эта величина мало меняется как в группе плоских, так и в группе объемных решеток и составляет:  $x_c = 0,5$  для плоских решеток и  $x_c = 0,16$  для объемных решеток [3].

Деградация – процесс обратный структурообразованию. Под действием механических напряжений, знакопеременных температур, жидких и газообразных агрессивных сред в структуре материала разрушаются связи, исключаются из работы отдельные узлы. При достижении порогом протекания значения  $x_c = 0,16$ , структура материала на макроуровне распадается на отдельные взаимно несвязанные кластеры и материал перестает отвечать функциональному назначению. Происходит переход системы от порядка к беспорядку [4].

Задачи связей и задачи узлов, в частности, рассмотрены и решены в работах академика В.П. Семенова. Им предложен граф переходов системы из одного состояния в другое на основе представления деградации структурной системы как процесса накопления отказавших структурных связей или узлов, рассмотрена матрица вероятностей перехода, предложены модели и функции деградации [5]. Теоретические и экспериментальные модели и функции деградации композиционных материалов получили свое дальнейшее развитие и в работах его учеников [6-10].

Учитывая вероятности переходных состояний системы, определяя среднее значение работающих узлов материала, зависимость интенсивности отказов  $\lambda_0$  от времени  $t$  и энергетического состояния  $U(t)$  структурной системы и осуществляя ряд преобразований получено выражение деградационной функции, описывающей изменение свойств материала во времени и имеющей вид:

$$D = 1 - \lambda_0 U(t) t^a, \quad (2)$$

где  $a$  – параметр, определяемый экспериментально, для стареющих элементов  $a > 1$ , для элементов со скрытыми дефектами  $a < 1$ .

Результаты теоретических исследований и анализ экспериментальных данных процессов деградации цементных композитов позволил выделить несколько видов моделей деградации, которые могут быть получены, если известно распределение свойств по сечению образца, изменение во времени прочностных характеристик на поверхности образца и координата фронта области деградации.

Изменения микротвердости и твердости образца в заданном сечении прямо пропорционально изменению механических характеристик – прочности и упругости, поэтому по кривым распределения микротвердости по сечению можно оценить распределение упруго-прочностных свойств.

Методом микротвердости были установлены границы области деградации и характер изменения

свойств по сечению образца в пределах этой области при действии агрессивной среды. Получены экспериментальные модели и функции деградации. В качестве примера представлены модели деградации цементного композита, состав которого содержит 10% кварцевого наполнителя с удельной поверхностью  $485 \text{ см}^2/\text{г}$ , крупностью  $0,48 \text{ мм}$ , экспонированного в 2% растворе серной кислоты и в 5% растворе сульфата магния (рис. 1а, б).

Применяя теоретически полученные: выражение деградационной функции (2), значение координаты фронта области разрушения под действием агрессивных сред  $a = v_x t + k(\xi) \sqrt{Dt}$ , анализируя экспериментальные данные и проведя ряд вычислений, для выше обозначенного состава цементного композита получены значения:

$$D = 1 - 0,069 t^{0,44},$$

$$a = 0,0042t + 0,065\sqrt{t}.$$

Деградационная функция несущей способности имеет вид:

$$D(N) = \frac{\sigma_3}{\sigma_0} \cdot \left(1 - \frac{a_1}{h}\right). \quad (3)$$

Подставив в формулу (3) ранее вычисленные значения  $D$  и  $a$ , получим:

$$D(N) = (1 - 0,069 t^{0,44}) \cdot \left(1 - \frac{0,0042t + 0,065\sqrt{t}}{h}\right).$$

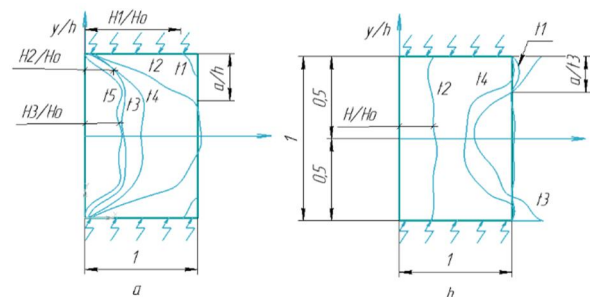


Рис. 1. Экспериментальные модели деградации:

а – среда 2% раствор серной кислоты;

б – среда 5% раствор сульфата магния

Таким образом, рассматривая деградацию композиционного материала в жидких агрессивных средах как процесс распада перколяционного кластера на отдельные конечные кластеры, сформированы модели деградации и определены деградационные функции несущей способности, которые достаточно точно описывают экспериментальные кривые деградации цементных композиционных материалов.

#### Библиографический список

1. Моделирование кластерных структур в перколяционных задачах с самоорганизацией / В. Н. Выровой, А. Н. Гергега, В. Г. Суханов, Ю. В. Кривченко // Тезисы докладов Международных конференций "Перспективные материалы с иерархической структурой для новых технологий и надежных конструкций" и "Химия нефти и газа" в рамках Международного симпозиума "Иерархические матери-



алы: разработка и приложения для новых технологий и надежных конструкций": Томск, 01–05 октября 2018 года. – Томск: Издательский дом Томского государственного университета, 2018. – С. 25-26. – DOI 10.17223/9785946217408/13. – EDN VQXWWJ.

2. Герега, А. Н. Модель самоорганизации ближайшей окрестности элементов перколяционных кластеров: зависимость свойств от истории формирования / А. Н. Герега, Ю. В. Кривченко // Физическая мезомеханика. – 2019. – Т. 22, № 4. – С. 83-94. – DOI 10.24411/1683-805X-2019-14009. – EDN KSSQMM.

3. Бобрышев, А. Н. Аналитическая оценка критического содержания элементов в задачах теории протекания / А. Н. Бобрышев, Э. Р. Галимов, Н. В. Козомазов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16, № 20. – С. 30-34. – EDN RFUTHV.

4. Химическое сопротивление и модели деградации железобетона: учебное пособие / В. П. Селяев, А. К. Осипов, П. В. Селяев, Е. Л. Кечуткина. — Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. — 220 с.

5. Химическое сопротивление композиционных строительных материалов / В.И. Соломатов, В.П. Селяев. – М.: Стройиздат, 1987. – 264 с.

6. Селяев, В. П. Фрактальная размерность пористых композиционных материалов / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, С. Н. Волкова // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций: Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук, профессора Се-

ляева Владимира Павловича, Саранск, 20–22 ноября 2014 года / Редколлегия: В.В. Петров, Е.М. Чернышов, Г.В. Мурашкин, С.Н. Леонович, А.М. Сулейманов, С.М. Анпилов, Т.А. Низина (ответственный редактор). – Саранск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва", 2014. – С. 176-180. – EDN TLXJTX.

7. Оптимизация составов цементных композиций, наполненных цеолитами / В. П. Селяев, А. К. Осипов, Л. И. Куприяшкина, С.Н. Волкова [и др.] // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1999. – № 4(484). – С. 36-39. – EDN SXEFAT.

8. Моделирование работы железобетонных конструкций с учетом совместного действия механических нагрузок и агрессивных сред / В. П. Селяев, П. В. Селяев, Е. Л. Кечуткина [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2021. – № 1(10). – С. 19-24. – DOI 10.51608/26867818\_2021\_1\_19. – EDN QSBQUA.

9. Селяев, В. П. Модели разрушения строительных композитов под действием агрессивных сред / В. П. Селяев, Т. А. Низина // Предотвращение аварий зданий и сооружений: Сборник научных трудов. Том Выпуск 8. – Москва: Магнитогорский дом печати, 2009. – С. 490-508. – EDN QGJOJF.

10. Химическое сопротивление железобетона / В. П. Селяев, П. В. Селяев, Л. И. Куприяшкина, Е. Л. Кечуткина. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2020. – 120 с. – ISBN 978-5-7103-4056-1. – EDN QRRZWS.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 15.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 15.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 69.04

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

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

2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_25

## ПРОВЕРКА АДЕКВАТНОСТИ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМОФЛУКТУАЦИОННЫХ КОНСТАНТ ПО ПРЯМОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ И КОНТРОЛЬНОЙ ТОЧКЕ ДЛЯ ДЕРЕВЯННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

© Авторы 2024

SPIN: 8826-1560

**ЕРОФЕЕВ Александр Владимирович**

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

*Тамбовский государственный технический университет*

*(Россия, Тамбов, e-mail: AV.Erofeev@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)*

AuthorID: 317727

**ЕЗЕРСКИЙ Валерий Александрович**

доктор технических наук, профессор кафедры «Архитектура и градостроительство»

*Тамбовский государственный технический университет*

*(Россия, Тамбов, e-mail: wiz75micz@rambler.ru)*

SPIN: 1041-9513

**АНПИЛОВ Сергей Михайлович**

Заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор кафедры ЖБК

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*

*(Россия, Новосибирск, e-mail: anpilovsm@gmail.com)*

**КАЗЬМИН Владислав Александрович**

студент

*Тамбовский государственный технический университет*

*(Россия, Тамбов, e-mail: kazmin2003@gmail.com)*

**Аннотация.** Показано, что в настоящее время прогнозирование долговечности осуществляется на базе термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования твёрдых тел. Согласно этой концепции для прогнозирования долговечности необходимо экспериментальным путём, определять четыре термофлуктуационные константы обобщённого уравнения Журкова. Одним из методов определения констант является методика по прямой температуре и контрольной точке. Существуют случаи схождения прямых температур зависимости логарифма долговечности от напряжения в точку при предельно низкой температуре. Такая закономерность наблюдается для деревянных конструкций. Поэтому целью настоящей работы является экспериментальная проверка адекватности указанной методики для случая схождения прямых температур в точку при предельно низкой температуре на примере деревянных конструкций. В работе экспериментально определены значения долговечности деревянных балочек при трёх различных температурах окружающей среды и пяти значениях неразрушающих напряжениях для каждой из выбранных температур. Термофлуктуационной константы обобщённого уравнения Журкова определены классическим способом и по методу прямой температуре и контрольной точке. Проведён сравнительный анализ полученных результатов и сделаны выводы о возможности и области применения методики определения долговечности по прямой температуре и контрольной точки в случае схождения прямых температур в точку при предельно низкой температуре.



**Ключевые слова:** деревянные балки; долговечность; обобщённое уравнение Журкова; обратный пучок; прогнозирование; работоспособность; термофлуктуационные константы; экспериментальное исследование; строительные конструкции

**Для цитирования:** Проверка адекватности метода определения термофлуктуационных констант по прямой температуре и контрольной точке для деревянных конструкций / А.В. Ерофеев, П.В. Монастырев, В.А. Езерский, С.М. Анпилов, В.А. Казьмин// Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 25-30. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_25.

Original article

## VERIFICATION OF THE ADEQUACY OF THE METHOD FOR DETERMINING THERMAL FLUCTUATION CONSTANTS BY DIRECT TEMPERATURE AND REFERENCE POINT FOR WOODEN STRUCTURES

© The Author(s) 2024

**YEROFEEV Alexander Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department  
*Tambov State Technical University*  
(Russia, Kazan, e-mail: AV.Erofeev@yandex.ru)

**MONASTYREV Pavel Vladislavovich**

Corresponding Member of the RAASN, Doctor of Technical Sciences,  
Associate Professor, Director of the Institute «Architecture,  
Construction and Transport»  
*RAASN; Tambov State Technical University*  
(Russia, Tambov, e-mail: monasteryev68@mail.ru)

**YEZERSKY Valery Alexandrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department  
*Tambov State Technical University*  
(Russia, Kazan, e-mail: wiz75micz@rambler.ru)

**ANPILOV Sergey Mikhailovich**

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical  
*Novosibirsk State Architectural and Construction University*  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: anpilovsm@gmail.com)

**KAZMIN Vladislav Alexandrovich**

Student  
*Tambov State Technical University*  
(Russia, Kazan, e-mail: kazmin2003@gmail.com)

**Abstract.** It is shown that at present the prediction of durability is carried out on the basis of the thermofluctuation concept of destruction and deformation of solids. According to this concept, in order to predict durability, it is necessary to experimentally determine the four thermal fluctuation constants of the generalized Zhurkov equation. One of the methods for determining constants is the direct temperature and control point method. There are cases of convergence of the direct temperatures of the dependence of the logarithm of durability on voltage to a point at an extremely low temperature. This pattern is observed for wooden structures. Therefore, the purpose of this work is to experimentally verify the adequacy of this technique for the case of convergence of direct temperatures to a point at extremely low temperatures using the example of wooden structures. The paper experimentally determined the values of durability of wooden beams at three different ambient temperatures and five values of non-destructive stresses for each of the selected temperatures. The thermal fluctuation constants of the generalized Zhurkov equation are determined in the classical way and using the direct temperature and control point method. The obtained results were compared, and conclusions were drawn about the possibility and scope of the methodology for determining durability by direct temperature and control point in the case of convergence of direct temperatures to a point at extremely low temperature.

**Keywords:** wooden beams; durability; generalized Zhurkov equation; reverse beam forecasting; operability; thermal fluctuation constants; experimental study; building structures

**For citation:** Verification of the adequacy of the method for determining thermal fluctuation constants by direct temperature and reference point for wooden structures / A.V. Yerofeyev, P.V. Monastirev, V.A. Yezersky, S.M. Anpilov, V.A. Kazmin // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 25-30. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_25.

**Введение.** Прогнозирование долговечности твердых тел осуществляется на базе термофлуктуационной концепции разрушения и деформирования твердых тел. Концепция была разработана в середине прошлого века советским ученым С.Н. Журковым. В основу концепции была положена гипотеза о решающем вкладе теплового движения кинетических единиц в процесс разрушения и деформирования твердых тел [1-5]. Для прогнозирования долговечности, согласно этой теории, необходимо экспериментальным путем определить 4 термофлуктуационные константы, входящие в обобщенное уравнение Журкова [6].

Одним из недостатков концепции является высокие трудозатраты по постановке и проведению экспериментов, направленных на определения зависимости долговечности от действующих напряжений и температуры окружающей среды [7]. Так, согласно классической методике определения термофлуктуационных констант, необходимо экспериментальное определение 15 точек графика логарифма долговечности от напряжений, причем каждая точка является результатом испытаний не менее 6 образцов, испытанных в идентичных условиях [8]. Альтернативой, направленной на снижение трудозатрат, является использование разработанной методики определения термофлуктуационных констант по прямой температуре и контрольной точке [9]. Методика базируется на доказанной гипотезе о линейности изменения угловых коэффициентов прямых температур зависимости логарифма долговечности от напряжения при условии неизменяемости структуры материала в рассматриваемом температурном диапазоне [10]. Исходя из этой гипотезы представляется возможным, определив иными методами константу  $T_m^*$  и определив экспериментальным способом прямую зависимости логарифма долговечности от напряжения при одной температуре (5 точек графика) и контрольную точку такой зависимости при другой температуре, определить точку полюса схождения прямых температур, а далее, используя метод эталонного пучка [11] определить оставшиеся константы.

В связи с вышеизложенным встает вопрос о необходимости проверке адекватности предложенной методики в случае схождения прямых температур в точку при предельной низкой температуре. Такая проверка осуществляется для деревянных конструкций (деревянные балки), так как именно для них наблюдается схождения прямых температур в точку при предельной низкой температуре.

*Методология*

Определение зависимости логарифма долговечности от напряжений и температуры окружающей среды проводилось для деревянных образцов-балочек сечением 20x20 мм при длине образца 220 мм с использованием системы рычагов (рисунок 1). Таким образом, использовался шестипозиционный стенд, состоящий из рамы 1, выполненной из уголков. На опорной площадке рамы 2 установлены опорные тумбы 3 на расстоянии друг от друга равным пролету балки (200 мм). Образец 4 помещается широкой стороной на опорные тумбы и нагружается с помощью грузового устройства 5 через рычаг 6. Передаточное отношение рычага составляло 4,125. Повышенная температура создается стержневыми электронагревателями 7. Для снижения теплопотерь и создания направленного теплового потока на опорную площадку устанавливается и закреплен на раме кожух 8. Температура задается ЛАТром 1М 220В-9А 9, а регулируется и измеряется потенциометром ЭПВ2-11А гр. ХК 0÷300 °С и дополнительно контролируется термометром с точностью  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Следует отметить, что термopара и шарик термометра расположены в зоне разрушения рабочего участка образца.

Для устранения влияния механических колебаний при разрушении образцов использовалось демпфирующее устройство – ёмкость, заполненную песком, сверху которого уложен резиновый ковёр  $\delta=20$  мм. [12].



Рисунок 1 – Схема установки для проведения испытаний

Для получения каждой точки испытывались не менее шести образцов в идентичных условиях. В процессе экспериментов, направленных на определение долговечности, фиксировалось время от момента начала нагружения до разрушающей нагрузкой ( $0,88\sigma_p, \dots, 0,98\sigma_p$ ) до разрушения образца. Полученные экспериментальные результаты статистически обрабатывались по [13].



Впоследствии по результатам испытаний, эмпирические константы, входящие в обобщенное уравнение Журкова, определялись классическим способом [14] и по предложенной методике. Полученные результаты подвергались сравнительному анализу.

**Результаты.** Результаты экспериментального исследования зависимости логарифма долговечности от действующих напряжений и температур после статистической обработки представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Результаты экспериментального испытания образцов древесины цельного сечения [15]

Температура, °С					
T <sub>1</sub> = 5		T <sub>2</sub> = 25		T <sub>3</sub> = 35	
Разрушающие напряжения, МПа					
σ <sub>p</sub> = 69,39		σ <sub>p</sub> = 57,65		σ <sub>p</sub> = 53,29	
σ, МПа	lgτ	σ, МПа	lgτ	σ, МПа	lgτ
68,00	0,43	56,5	0,81	52,22	0,87
65,92	0,88	54,77	1,31	50,63	2,04
64,53	1,66	53,61	1,45	49,56	2,18
62,45	1,98	51,88	2,85	47,96	2,56
61,06	2,50	50,73	2,93	46,90	3,70

По данным таблицы 1 построено семейство веерообразных прямых (рисунок 2, а) и по классической методике, основанной на перестроении графиков, найдены термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова.

Прямолинейная зависимость  $lg(\tau) = f(\sigma)$  при температуре 5°С описывается уравнением:  $lg(\tau) = -0,299 \cdot \sigma + 20,758$ , при температуре 25°С  $lg(\tau) = -0,404 \cdot \sigma + 23,505$ , а при температуре 35°С  $lg(\tau) = -0,457 \cdot \sigma + 24,864$ .

При перестроении графика в координатах «lgτ – σ» (рисунок 2, а) в график в координатах «lgτ – 1000/T» (рисунок 2, б) были выбраны напряжения 40, 45 и 50 МПа. Прямолинейная зависимость  $lg\tau = f(1000/T)$   $lg(\tau) = f(1000/T)$  для напряжения 40 МПа описывается уравнением:  $lg(\tau) = 6,297 \cdot (1000/T) - 13,866$ . Прямая напряжения 45 МПа описывается уравнением:  $lg(\tau) = 8,543 \cdot (1000/T) - 23,446$ . Прямая напряжения 50 МПа описывается уравнением:  $lg(\tau) = 10,792 \cdot (1000/T) - 33,035$ .

Для деревянных балочек прямолинейная зависимость  $U_0^* = f(\sigma)$  (рисунок 2, в) описывается следующим уравнением:  $U_0^* = 7,363 \cdot \sigma - 172,14$ . Таким образом, термофлуктуационные константы деревянных балочек равны:  $lg\tau_m^* = 12,5$ ;  $T_m^* = 235$ ;  $U_0^* = -172,14$ ;  $\gamma^* = -7,363$ .

Далее определим термофлуктуационные константы обобщенного уравнения Журкова по прямой температуры и контрольной точки. В качестве исходных экспериментальных данных будут использованы данные таблицы 1 при температуре 5 °С (построение прямой температуры). С целью всестороннего анализа влияния на точность определения термофлукту-

ационных констант обобщенного уравнения Журкова выбора контрольной точки расчеты выполнены для 10 контрольных точек.

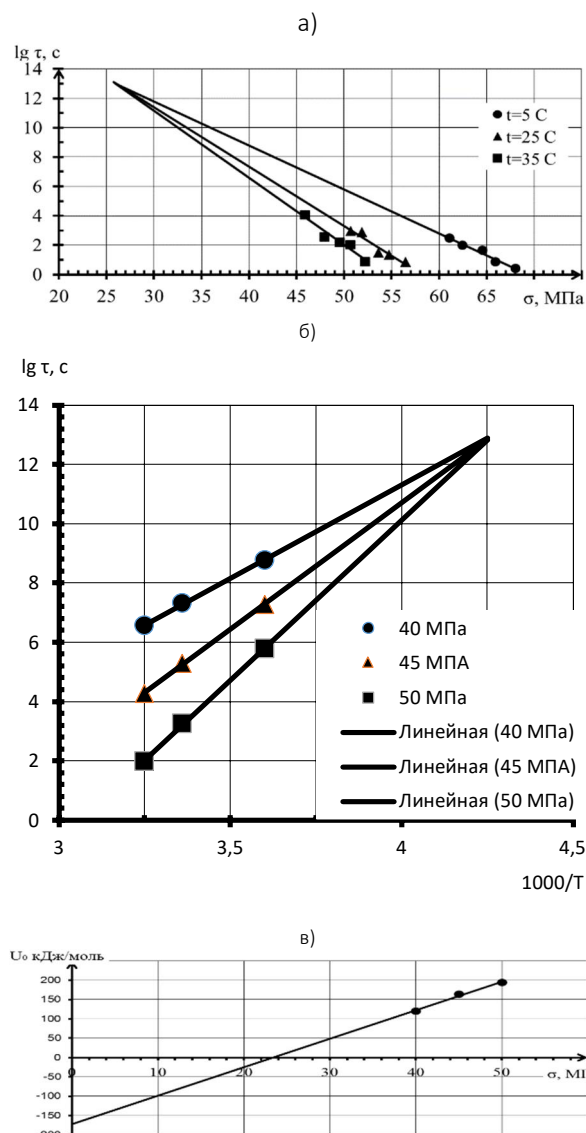


Рисунок 2 – Графическая интерпретация определения термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова для деревянных балочек

а – зависимость логарифма долговечности от напряжения; б – зависимость логарифма долговечности от обратной температуры увеличенной в 1000 раз; в – зависимость энергии активации процесса разрушения от напряжения

Константа  $T_m^*$ , согласно методике, определяется иными способами. Для исследуемой древесины она составляет 235 К.

Уравнение зависимости логарифма долговечности от напряжения для температуры 5 °С будет иметь вид  $lg\tau = -0,299 \cdot (\sigma) + 20,758$ . Разрешая систему уравнений:

$$\begin{cases} a = c^* \cdot T + d^* \\ T_m^* = \frac{-d^*}{c^*} \end{cases} \quad (1)$$



относительно  $c^*$  и  $d^*$  при известных значениях  $1000/T$ ,  $T_m$  и  $a$ , получим  $c^*=0,4543$  и  $d^*=-1,9331$ . Полученные значения  $c^*$  и  $d^*$  позволяют определить для каждой контрольной точки уравнение второй прямой, которые приведены в таблице 2. Значение константы  $lg\tau_0$  определяется из ординаты точки пересечения прямых температур. Константы  $U_0$  и  $\gamma$  определяются через систему коэффициентов по методу эталонного пучка.

Таблица 2 – Уравнение прямой при выбранной контрольной точке

T, °C	$\sigma$ , МПа	Уравнение второй прямой
25	56,50	$lg(\tau) = -0,4087 \cdot (\sigma) + 23,8998$
25	54,77	$lg(\tau) = -0,4087 \cdot (\sigma) + 23,6928$
25	53,61	$lg(\tau) = -0,4087 \cdot (\sigma) + 23,3588$
25	51,88	$lg(\tau) = -0,4087 \cdot (\sigma) + 24,0518$
25	50,73	$lg(\tau) = -0,4087 \cdot (\sigma) + 23,6618$
35	52,22	$lg(\tau) = -0,4582 \cdot (\sigma) + 24,7953$
35	50,63	$lg(\tau) = -0,4582 \cdot (\sigma) + 25,2368$
35	49,56	$lg(\tau) = -0,4582 \cdot (\sigma) + 24,8865$
35	47,96	$lg(\tau) = -0,4582 \cdot (\sigma) + 24,5335$
35	46,90	$lg(\tau) = -0,4582 \cdot (\sigma) + 25,1878$

Для удобства проведения сравнительного анализа полученных термофлуктуационных констант и долговечностей различными методиками все полученные значения сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Термофлуктуационные константы и расчетные сроки службы деревянных балок полученные при использовании различных методик

Методика	$lg\tau_m^*$	$T_m^*$	$U_0^*$	$\gamma^*$
Классическая	12,5	235	-172,14	-7,363
Методика по прямой температуры и контрольной точки				
T, °C	$\sigma$ , МПа			
25	56,50	12,19	-248,45	-8,67
25	54,77	12,76	-232,08	-8,67
25	53,61	13,67	-205,67	-8,67
25	51,88	11,78	-260,47	-8,67
25	50,73	12,84	-229,63	-8,67
35	52,22	13,17	-219,99	-8,67
35	50,63	12,34	-244,04	-8,67
35	49,56	13,00	-224,96	-8,67
35	47,96	13,67	-205,72	-8,67
35	46,90	12,44	-241,38	-8,67

**Обсуждение.** Анализ таблицы 3 показывает, что при самом неблагоприятном условии погрешность определения константы  $lg\tau_m^*$  не превышает 9 %, константы  $U_0^*$  – 41 %, а  $\gamma^*$  – 16,3 %. Таким образом, если внимательно относиться к выбору контрольной точки и повышать экспериментальную выборку определения зависимости логарифма долговечности от напряжения для нее погрешность определения термофлуктуационных констант будет приемлемой. Для случая схождения прямых температур зависимости логарифма долговечности от напряжений при предельно низкой температуре основным вопросом применимости рассматриваемой методики остается вопрос нахождения константы  $T_m$ .

## Выводы

Таким образом, в случае если не требуется высокая точность определения термофлуктуационных констант обобщенного уравнения Журкова при необходимости снижения трудозатрат на их определение почти в 3 раза возможно использовать в случае схождения прямых температур в точку при предельно низкой температуре разработанную методику по определению термофлуктуационных констант по прямой температуре и контрольной точке.

Перспективой дальнейшего исследования является проверка адекватности приведенной методики для широкого круга строительных материалов, для которых наблюдается схождения прямых температур в точку при предельно низкой температуре.

## Библиографический список

1. Регель, В.Р. Кинетическая природа прочности твердых тел / В.Р. Регель, А.И. Слуцкер, Э.Е. Томашевский. – М.: Наука, 1974. – 560 с.
2. Журков, С.Н. Проблема прочности твердых тел / С.Н. Журков // Вестник Академии Наук СССР. - 1957. - № 11. - С. 78-84.
3. Журков С.Н., Назруллаев Б.Н. Временная зависимость прочности твердых тел // Журнал технической физики. 1983. Т. 23. № 10. С. 1677.
4. Ратнер, С.Б. Физическая механика пластмасс. Как прогнозируют работоспособность? / С.Б. Ратнер, В.П. Ярцев. – М.: Химия, 1992. – 320 с.
5. Слуцкер, А. И. (Санкт-Петербург) ФОРМУЛА ЖУРКОВА. XV Петербургские чтения по проблемам прочности. Санкт-Петербург, 12-14 апреля 2005 г.: сборник тезисов. - СПб., 2005, 174 с.
6. Ярцев, В.П. Прогнозирование поведения строительных материалов при неблагоприятных условиях эксплуатации / В. П. Ярцев, О. А. Киселева. – Тамбов.: Министерство образования и науки Российской Федерации, ФГБОУ ВО «ТГТУ», 2009. – 124 с.
7. Ерофеев, А. В. Проблематика прогнозирования работоспособности строительных материалов с позиций термофлуктуационной концепции / А. В. Ерофеев // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 382-383.
8. Ярцев, В. П. Термофлуктуационные закономерности разрушения и деформирования минераловатной плиты при силовом воздействии / В. П. Ярцев, В. М. Данилов // Промышленное и гражданское строительство. – 2023. – № 7. – С. 79-84.
9. Erofeev, A. Method for determining the thermal fluctuation constants of the generalized Zhurkov equation / A. Erofeev, T. Gorokhov // Magazine of Civil Engineering. – 2023. – No. 2(118). – DOI 10.34910/MCE.118.4
10. Ерофеев, А. В. Гипотеза о линейности изменения угловых коэффициентов прямых температур зависимости логарифма долговечности от напряжения / А. В. Ерофеев, Т. И. Горохов, С. И. Горохов // Актуальные вопросы архитектуры и строительства: материалы юбилейной двадцатой международной научно-технической конференции, посвященной 90-летию Мордовского государственного университета имени Н.П. Губкина в г. Саранске, 2023. – Саранск: Мордовский государственный университет имени Н.П. Губкина, 2023. – С. 10-14.



ного университета им. Н.П. Огарёва, Саранск, 27 декабря 2021 года. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2021. – С. 291-295

11. Reference Beam Method for Determining Thermal Fluctuation Constants / A. Erofeev, T. Gorokhov, S. Emelyanov, E. Pakhomova // Modern Problems in Construction : Selected Papers from MPC 2022, Kursk, 17–18 ноября 2022 года. – Kursk: Springer Nature Switzerland AG, 2024. – P. 93-102.

12. Эксплуатационные свойства и долговечность экструзионного пенополистирола ПЕНОПЛЭКС® / В. П. Ярцев, С. А. Струлев, А. А. Мамонтов, В. Г. Рупышев. – Тамбов : Тамбовский государственный технический университет, 2016. – 115 с. – ISBN 978-5-8265-1537-2.

13. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения

14. Ярцев, В.П. Физико-технические основы работоспособности органических материалов в деталях и конструкциях: дис. ... д-ра техн. наук : 05.23.05 / В.П. Ярцев. – Воронеж, 1998. – 350 с.

15. Ерофеев, А.В. Проверка метода эталонного пучка на примере древесины / А.В. Ерофеев, Н.С Ковалев, Т.И. Горохов, М.В. Павлинов // Вестник Западно-Казахстанского инновационно технологического университета Научный журнал. №4 (28) 2023. С. 260-266.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 09.10.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 09.10.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 624.011.14

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

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

2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_31

## АНАЛИЗ КОНСТРУКТИВНЫХ РЕШЕНИЙ НЕСУЩИХ РЕБЕР КРУПНОРАЗМЕРНЫХ СОВМЕЩЕННЫХ ПАНЕЛЕЙ НА ДЕРЕВЯННОМ КАРКАСЕ

© Авторы 2024

SPIN: 3532-3166

**ЖАДАНОВ Виктор Иванович**

советник РААСН, Заслуженный строитель России, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительных конструкций  
*Оренбургский государственный университет*  
(Россия, Оренбург, e-mail: organ-2003@bk.ru)

SPIN: 5885-6291

**НЕСТЕРЕНКО Максим Алексеевич**

аспирант кафедры строительных конструкций  
*Оренбургский государственный университет*  
(Россия, Оренбург, e-mail: nesterenko\_m\_a@mail.ru)

SPIN: 2849-7361

**ПИНАЙКИН Игорь Петрович**

кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства  
*Иркутский национальный исследовательский технический университет*  
(Россия, Иркутск, e-mail: pinaykin@bk.ru)

**Аннотация.** Крупноразмерные совмещенные панели на деревянном каркасе находят широкое применение в отечественной и зарубежной строительной практике, сочетая в себе все известные преимущества древесины как строительного материала. Эффективность их применения достигается за счет совмещения несущих и ограждающих функций, когда основные несущие ребра работают совместно с обшивками при восприятии внешних эксплуатационных нагрузок. Наиболее целесообразно применение крупноразмерных панелей как конструкций «на пролет» с их опиранием непосредственно на продольные несущие стены или подстропильные элементы. При этом к основным недостаткам известных конструктивных решений относится либо значительная материалоемкость, либо большая трудоемкость изготовления. Как правило, отмеченные недостатки относятся к конструкциям основных несущих ребер. В статье представлен критический анализ известных конструктивных решений крупноразмерных совмещенных панелей на деревянном каркасе с учетом включения обшивок в общую работу конструкции, отражены их преимущества и недостатки. С учетом результатов проведенного анализа предложены пути усовершенствования конструкций основных ребер, реализация которых обеспечивает снижение материалоемкости и простоту изготовления рассматриваемого класса панелей с сохранением их показателей прочности и жесткости.

**Ключевые слова:** крупноразмерная панель; совмещенная конструкция; деревянный каркас; строительные конструкции; несущее ребро; обшивка; расход материалов; древесина; фанера

**Для цитирования:** Жаданов В.И., Нестеренко М.А., Пинайкин И.П. Анализ конструктивных решений несущих ребер крупноразмерных совмещенных панелей на деревянном каркасе // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 31-36. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_31.



Original article

## ANALYSIS OF STRUCTURAL SOLUTIONS OF BEARING RIBS OF LARGE-SIZED COMBINED PANELS ON A WOODEN FRAME

© The Author(s) 2024

**ZHADANOV Viktor Ivanovich**

Dr. of Technical, Prof.

Orenburg State University

(Russia, Orenburg, e-mail: organ-2003@bk.ru)

**NESTERENKO Maxim Alekseevich**

PhD Candidate

Orenburg State University

(Russia, Orenburg, e-mail: nesterenko\_m\_a@mail.ru)

**PINAYKIN Igor Petrovich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department

Irkutsk National Research Technical University

(Russia, Irkutsk, e-mail: Irkutsk)

**Abstract.** Large-sized combined panels on a wooden frame are widely used in domestic and foreign construction practice, combining all the well-known advantages of wood as a building material. The effectiveness of their application is achieved by combining load-bearing and enclosing functions, when the main load-bearing ribs work together with the sheaths when external operational loads are perceived. It is most advisable to use large-sized panels as “span-by-span” structures with their support directly on longitudinal load-bearing walls or substructure elements. At the same time, the main disadvantages of known design solutions include either significant material consumption or high complexity of manufacturing. As a rule, the noted disadvantages relate to the structures of the main load-bearing ribs. The article presents a thorough examination of the established design solutions for large-sized combined panels on a wooden frame, taking into account the incorporation of sheaths in the overall design of the structure. Both their advantages and disadvantages are reflected. Taking into account the results of the analysis, ways to improve the structures of the main ribs are proposed, the implementation of which ensures a reduction in material consumption and ease of manufacture of the considered class of panels while maintaining their strength and stiffness.

**Keywords:** large-size panel; combined structure; wooden frame; building structures; bearing rib; cladding; material consumption; wood; plywood

**For citation:** Zhadanov V.I., Nesterenko M.A., Pinaykin I.P. Analysis of structural solutions of bearing ribs of large-sized combined panels on a wooden frame // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 31-36. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_31.

**Введение.** Строительная отрасль является потребителем огромных материальных и энергетических ресурсов. Увеличение эффективности их использования является одной из глобальных проблем в народном хозяйстве, как нашей страны, так и практически всех зарубежных стран в целом. Одним из путей достижения такого увеличения является повышение степени заводской готовности строительных конструкций и уровня их индустриализации. Причем такое направление относится к несущим и ограждающим элементам, выполненным из различных материалов, будь то железобетон, сталь или дерево. Другим не менее важным направлением повышения эффективности строительства можно считать применение в зданиях и сооружениях блочных конструкций с наибольшими габаритными размерами [1-4], которые могут быть ограничены только лишь возможностями технологических линий по их изготовлению и

условиями транспортировки. В строительных конструкциях с применением древесины и древесных материалов реализация вышеназванных направлений стала возможна благодаря активному развитию заводов по выпуску клееных несущих элементов с соответствующими технологическими линиями.

Применение клеевых соединений в деревянных конструкциях также открыло возможность применения в строительной практике так называемых совмещенных крупноразмерных панелей покрытий, перекрытий и стенового ограждения, в которых обшивки при помощи клея жестко соединены с деревянным каркасом [5-7]. В этом случае в одной конструкции совмещаются несущие и ограждающие функции, т.е. основные продольные ребра выполняют роль колонн или балок перекрытий, а обшивки, включенные в общую работу панели являются ограждениями зданий и сооружений. Такие крупно-



размерные совмещенные элементы могут служить унифицированными блоками, обеспечивая при строительстве различных зданий и сооружений быстроту монтажа и, при необходимости, сборно-разборность. Не вызывает сомнений целесообразность применения совмещенных конструкций в малоэтажном строительстве, в том числе в удаленных от производственных баз районах, при возведении различных объектов для размещения геологов, пограничников, спасательных служб МЧС, а также при ликвидации последствий стихийных бедствий [8]. Практика отечественного и зарубежного строительства показывает [9-10], что наиболее целесообразно применение крупноразмерных панелей как конструкций «на пролет» с их опиранием непосредственно на продольные несущие стены или подстропильные элементы. Такое конструктивное решение позволяет увеличить технико-экономическую эффективность проектируемого объекта на 25-30% в сравнении с аналогичными плоскостными элементами.

Однако, при всех вышеотмеченных преимуществах известные конструктивные решения крупноразмерных панелей на деревянном каркасе не лишены ряда недостатков в виде достаточно высокой материалоемкости или значительной трудоемкости изготовления. Представляется целесообразным определить пути и предложить возможные варианты их реализации в части совершенствования конструктивных решений рассматриваемого класса конструкций.

**Методология проведения анализа.** Цель настоящей работы заключается в поиске рациональных решений несущих ребер совмещенных крупноразмерных панелей на деревянном каркасе, обеспечивающих как снижение материалоемкости проектируемой конструкции, так и простоту её заводского изготовления. Для достижения поставленной цели выполнен обзор известных конструктивных решений крупноразмерных совмещенных панелей на деревянном каркасе с учетом включения обшивок в общую работу конструкции. Определен расход основных строительных материалов на рассмотренные конструкции и особенности технологии их изготовления. На следующем этапе проведен критический анализ преимуществ и недостатков конструкций рассматриваемого класса. С учетом результатов проведенного анализа предложены пути усовершенствования конструкций основных ребер, реализация которых обеспечивает снижение материалоемкости и простоту изготовления крупноразмерных панелей на деревянном каркасе с сохранением их показательной прочности и жесткости.

**Результаты и обсуждение.** На первом этапе работы проанализированы известные конструктивные решения крупноразмерных панелей на деревянном каркасе, нашедшие применение в отечествен-

ной строительной практике. Наиболее характерные примеры таких конструкций и их особенности конструкции приведены в таблице 1.

Таблица 1. Основные типы крупноразмерных совмещенных панелей на деревянном каркасе

№ п/п	Поперечное сечение	Организация - разработчик	Рекомендуемые габариты L и B, м	Применяемые материалы
1.		КИСИ, г. Киев	L=9, 12, 18 м B=1,5 м	Клееная древесина, фанера
2.		КИСИ, г. Киев	L=9, 12, 18 м B=1,5 м	Клееная древесина, фанера
3.		КИСИ, г. Киев	L=9, 12, 18 м B=1,5 м	Клееная древесина, фанера
4.		ЦНИИ-Пром-зданий, г. Москва	L=9, 12, 18 м B=1,5 м	Клееная и цельная древесина, фанера
5.		Южгипропроект-сельстрой, г. Краснодар	L=9, 12 м B=1,5; 3,0 м	Цельная древесина, асбестоцементные листы
6.		Кишиневский политехнич. институт,	L=9, 12 м B=1,5 м	Клееная древесина, фанера
7.		Целиноградский ИСИ	L=12, 18 м B=1,5; 3,0 м	Клееная древесина, арматура, фанера
8.		Сибстрин, г. Новосибирск	L=9, 12, 18 м B=1,5; 3,0 м	Клееная древесина, фанера

Было выявлено, что наиболее часто такие конструкции, в том числе как совмещенные элементы «на пролет», применяют при пролетах от 9,0 до 18,0 метров при их ширине от 1,5 до 3,0 метра. Количество основных несущих ребер варьируется от двух до четырех. Они выполнены из клееной древесины прямоугольного поперечного сечения или из двутавровых клефанерных балок. В конструкции панели, разработанной в Целиноградском ИСИ, предусмотрены армированные клеешатые ребра. В качестве обшивок, как правило, применяют водостойкую фанеру марки ФСФ толщиной 9...12 мм или другие листовые материалы типа OSB, плоских асбестоцементных листов и т.п. Неизменяемость формы поперечного сечения конструкции обеспечивается диафрагмами жесткости, установленными с шагом до



6,0 метра или перекрестными раскосами (п. 7 таблицы 1). Приведённые типы панелей разработаны для отапливаемых зданий, при этом аналогичные конструкции могут быть использованы и для покрытия холодных помещений, например, за счет отказа от нижней обшивки и размещенного на ней утепляющего и пароизоляционного слоев.

Для оценки влияния конструктивных особенностей крупноразмерных панелей на их материалоемкость определен расход основных материалов на конструкции, приведенные в таблице 1. С точки зрения обеспечения сопоставимости сравниваемых вариантов расчеты проведены для утепленных панелей с размерами в плане 1,5x12,0 м под нагрузку для III снегового района (таблица 2).

Анализ данных, приведенных в таблице 2, позволяет констатировать следующие факты.

1. Основная доля расхода материалов на конструкцию панели определяется материалоемкостью основных несущих ребер, причем эта доля составляет от 75% до 81% в случае клеодощатых ребер и 70-76% при применении клефанерных ребер. Данный факт подтверждает правильность выбранного пути исследования, направленного на поиск рациональных конструктивных решений именно продольных несущих элементов.

2. Панели только с двумя несущими ребрами имеют меньшую материалоемкость в сравнении с конструкциями с тремя и четырьмя ребрами. Например, аналогичные конструкции КИСИ с двумя ребрами имеют расход материалов на 12,4% меньше в сравнении с панелью с четырьмя ребрами и на 9,4% меньше, чем у панели с тремя ребрами.

материалоемкости конструкции до 30%, что характерно видно из примеров панелей, предложенных в Южгипрониисельстрое и в Кишиневском политехническом институте.

4. Включение фанерных обшивок в общую работу панелей за счет применения клеевых соединений позволяет существенно (на 35-60%) увеличить геометрические характеристики поперечных сечений проектируемых конструкций [11-13], что приводит к соответствующей экономии материала. Например, в совмещенной панели Кишиневского политехнического института только вовлечение фанерных обшивок в общую работу конструкции обеспечило снижение общей материалоемкости на 15% в сравнении с панелью Южгипрониисельстроя, в которой асбестоцементные обшивки выполняют лишь ограждающие функции.

Несомненно, что добиться снижения материалоемкости конструкции возможно за счет специальных конструктивных мероприятий, например, выполнения обшивки с двоякой кривизной, применения армированных ребер, как предусмотрено в разработке Целиноградского ИСИ. Однако в таком случае необходимо учитывать показатели трудоемкости изготовления панелей. В предложенной конструкции, например, достигнуто сокращение расхода материалов на 24% в сравнении с панелью КИСИ, выполненной также с двумя ребрами, но трудоемкость её изготовления более чем в три раза увеличена. Можно с достаточной уверенностью предположить, что при определении такого объективного показателя как «стоимость в деле», предложенная целиноградскими учеными конструкция не будет экономически эффективной. Также панель Кишиневского ИСИ, в которой неизменяемость поперечного сечения обеспечивается перекрестными деревянными подкосами, имеет повышенную трудоемкость изготовления из-за многодельности и трудности обеспечения плотного контакта этих подкосов с продольными ребрами. Целесообразно, с учетом опыта изготовления крупноразмерных панелей на заводах клееных деревянных конструкций, применять поперечные диафрагмы, конструкция которых аналогична основным ребрам.

Кроме этого, проведенный анализ технико-экономических показателей выше рассмотренных крупноразмерных панелей показал, что в случае вовлечения обшивок в общую работу конструкции целесообразно отказаться от нижней обшивки и размещать утепляющий слой по верху верхней обшивки с устройством соответствующих обрамляющих элементов. Это объясняется тем, что в соответствии с [14], растянутая обшивка учитывается в общей работе панели с коэффициентов 0,6, вводимым к её геометрическим характеристикам (учет возможного непрочлея в стыках фанеры). Это увеличивает расход

**Таблица 2. Расход основных материалов на панели размером 1,5x12,0 м**

Тип панели (пункт в таблице 1)	Расход основных материалов на панели, м <sup>3</sup> (%)		
	Общий	На несущие ребра	На ограждающую часть
КИСИ (п.1)	1,93 (100%)	1,57 (81%)	0,36 (19%)
Панель КИСИ (п.2)	1,81 (100%)	1,45 (80%)	0,36 (20%)
Панель КИСИ (п.3)	1,69 (100%)	1,26 (75%)	0,43 (25%)
ЦНИИПромзданий (п.4)	1,74 (100%)	1,29 (74%)	0,45 (26%)
Южгипрониисельстрой (п.5)	1,40 (100%)	1,04 (74%)	0,36 (26%)
КПИ, г. Кишинев (п.6)	1,20 (100%)	0,84 (70%)	0,36 (30%)
ЦИСИ, г. Целиноград (п.7)	1,28 (100%)	0,91 (62%)	0,37 (38%)
Сибстрин (п.8)	1,33 (100%)	1,04 (78%)	0,29 (22%)

3. Замена массивных клеодощатых ребер прямоугольного поперечного сечения на двутавровые клефанерные элементы обеспечивает снижение



материалов на конструкции и её стоимость. Также немаловажным является и тот факт, что при таком техническом решении достигается защита основных несущих ребер от загнивания в случае их увлажнения за счет быстрого проветривания.

Немаловажным аспектом применения крупноразмерных панелей в строительстве является их проектирование как конструкций «на пролет». При таком решении, в сравнении с традиционными плоскостными конструкциями и уложенными по ним ограждающими элементами, достигается укрупнение монтажных элементов и уменьшение их количества, исключение необходимости устройства горизонтальных связей в покрытии, практически 100-процентная заводская готовность конструкций, поставляемых на строительную площадку. В этом случае основные несущие ребра целесообразно проектировать двускатными, а не постоянной высоты по длине как в рассмотренных примерах. Это позволит не только сократить общий расход материалов на конструкцию, но и обеспечить надлежащий водоотвод с покрытия [15-17].

С учетом проведенного анализа авторами предложен вариант крупноразмерной совмещенной панели с клефанерными ребрами, отличающийся от выше рассмотренных конструктивных решений сниженной материалоемкостью и простотой изготовления (рис. 1). Характерной особенностью предложенной конструкции является отказ от нижней обшивки и выполнение несущих ребер с прерывистой фанерной стенкой.

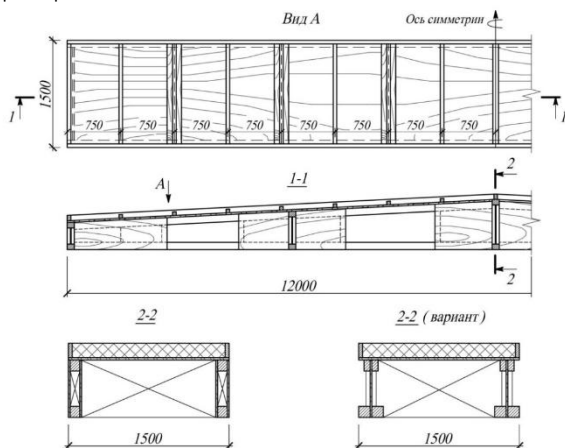


Рис. 1 – Предложенный вариант крупноразмерной совмещенной панели с клефанерными ребрами с прерывистой стенкой

Такое конструктивное решение не только снижает материалоемкость конструкции, но и позволяет в пределах высоты продольных несущих ребер располагать необходимые технологические инженерные коммуникации. Применение клефанерных балок с различными площадями верхнего и нижнего поясов (рис.1, вариант сечения 2-2) существенно (до 22% в зависимости от толщины фанерной обшивки) увеличить геометрические характеристики расчет-

ных поперечных сечений в сравнении с балками с равными по площади поясами.

Авторы отмечают, что материалы настоящей статьи не отражают все возможные пути совершенствования рассматриваемого класса конструкций. Выражаем надежду, что они дадут импульс для проведения дальнейших интересных исследований в области крупноразмерных панелей, в том числе с применением современных материалов на основе древесины типа OSB, LVL, CLT, стекломагнезитов или использования балок на основе разномодульных материалов, например, деревометаллических [18]. Такие разработки и исследования, несомненно, обеспечат повышение эффективности строительства с применением деревянных конструкций и их конкурентоспособность на строительном рынке.

### Выводы

1. В результате выполненного анализа известных конструктивных решений несущих ребер крупноразмерных совмещенных панелей на деревянном каркасе определены их основные преимущества и недостатки. Отражено, что рассматриваемые конструкции наиболее целесообразно применять в покрытиях зданий как панели «на пролет» с их опиранием непосредственно на продольные несущие стены или подстропильные элементы.

2. Технически обоснованы пути дальнейшего совершенствования рассматриваемого класса конструкций, как в части несущих ребер, так и в отношении конструктивных решений крупноразмерных панелей в целом.

3. Реализация предложенных направлений дальнейшего совершенствования крупноразмерных совмещенных панелей на деревянном каркасе, проиллюстрированная конкретными примерами, обеспечит снижение материалоемкости конструкций и сокращение трудозатрат на их изготовление.

### Библиографический список

1. Лебедева, М. А. Место клееных деревянных конструкций в современном строительстве и архитектуре / М. А. Лебедева. // Молодой ученый. – 2018. – № 50 (236). – С. 46-48.
2. Атлас деревянных конструкций / К.-Г. Гетц, Д. Хоор, К. Мелер, Ю. Наттерер. Пер. с нем. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.
3. Современное деревянное строительство / Й. Штевка, Л. Райнпрехт. Пер. со словац. – М.: Изд-во «Ниола-Пресс», 2006. – 184 с.
4. Шмидт, А.Б. Атлас строительных конструкций из клееной древесины и водостойкой фанеры / А.Б. Шмидт, П.А. Дмитриев. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов. – 2001. – 292 с.
5. Житушкин, В.Г. Клефанерные конструкции / В.Г. Житушкин // - М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов. – 2011. – 200 с.
6. Жербин М.М. Повышение эффективности металлических и деревопластмассовых конструкций // Киев. Будивельник. 1978. – 144 с.



7. Вдовин, В.М. Конструкции из дерева и пластмасс. Проектирование клеёдощатых и клеёфанерных конструкций, балок и рам / В.М. Вдовин. – Пенза: Изд-во ПГУАС, 2016. – 208 с.
8. Gusakova, N. Development of organizational and economic mechanism of intensification of low-rise housing construction in remote areas with special climatic conditions / N. Gusakova, A. Gusakov, Y. Prokhorova, I. Karakozova, // E3S Web of Conferences, 2022, 363, 02035.
9. Жаданов, В.И. Эффективность применения крупноразмерных плит на основе древесины в покрытиях зданий / В.И. Жаданов, И.И. Яричевский // Интеграция, партнерство и инновации в строительной науке и образовании: материалы международной научной конференции. Москва. МГСУ. 2015. С.150-154.
10. Gusakova, N.V. Selection criteria of space planning and structural solutions of low-rise buildings / N.V. Gusakova, K.E. Filyushina, A.M. Gusakov, N.N. Minaev // Magazine of Civil Engineering, 2017, 75(7), s. 84–93.
11. Нестеренко, М.А. Влияние различных факторов на напряженно-деформированное состояние совмещенных плит на деревянном каркасе с обшивками из листовых материалов / М.А. Нестеренко // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство, транспорт: материалы X-й МНПК. – Тамбов. – ТГТУ. – 2024. – С.140-143.
12. Ибрагимов, А.М. Клеёфанерная панель заводского производства как основной конструктивно-силовой элемент остова быстровозводимого жилого здания / А.М. Ибрагимов, Л.Ю. Гнедина, Л.А. Тихомиров, И.А. Ладных // Жилищное строительство. – 2017. – №4. – С. 30-32.
13. Лисов, С.В. Применение фанеры в несущих конструкциях для малоэтажного строительства / С.В. Лисов // Университетский комплекс как региональный центр образования, науки и культуры: материалы всероссийской научно-методической конференции. – Оренбург: ОГУ, 2024. - с. 3148-3152.
14. СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80. - М.: Стандартинформ, 2017. - 96 с.
15. Shishov I. Application of variable-height beams with wooden sub-rafter elements in the roof structures of industrial buildings / I. Shishov, M. Lisyatnikov, M. Lukin, V. Deev, S. Roshcina // E3S Web of Conferences, 2023, 460, 10046.
16. Жаданов, В.И. Клеёфанерные панели на деревянном каркасе / В.И. Жаданов, Д.А. Украинченко, М.А. Аркаев, И.В. Руднев. – Оренбург: ИПК «Университет». – 2021. – 142 с.
17. Жаданов, В.И. Деревянные панельные конструкции для малоэтажного строительства / В.И. Жаданов, Д.А. Украинченко – Оренбург: ООО ИПК «Университет», 2013. – 390с.
18. Калинин, С.В. Особенности напряжённо-деформированного состояния деревометаллических балок со стенкой из стальных профилированных листов / С.В. Калинин, Д.А. Украинченко // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2012. – №9. – С. 184-190.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 29.10.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 29.10.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 691

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения; 2.1.5. Строительные материалы и изделия;  
2.1.7. Технология и организация строительства

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_37

### ИННОВАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ВОЗВЕДЕНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

© Авторы, 2024  
SPIN:7103-3750

**ЗАЙЧЕНКО Николай Михайлович**  
доктор технических наук, профессор  
*Донбасская национальная академия строительства  
и архитектуры*  
(Россия, Макеевка e-mail: mailbox@donnasa.ru)

SPIN:9254-3688

**МАИЛЯН Левон Рафаэлович**  
академик РААСН, доктор технических наук, профессор  
*Российская академия архитектуры и строительных наук;  
Донского государственного технического университета*  
(Россия, Ростов-на-Дону, e-mail: lrm@aanet.ru)

**Аннотация.** В работе обобщен практический опыт исследований современных технологий быстрого возведения объектов массового строительства из высокотехнологичных систем на основе инновационных легких стальных тонкостенных конструкций. Показаны примеры практической реализации научных исследований в реальном секторе экономики. При этом важным фактором внедрения быстровозводимых технологий на объектах массового строительства является полная их совместимость с местными сырьевыми ресурсами, что позволяет существенно обеспечить высокое качество объектов капитального строительства и значительное снижение себестоимости строительной продукции.

**Ключевые слова:** строительство; технологии; местные сырьевые ресурсы и материалы; инновационные технологии; быстровозводимые объекты; ТИМ; практическая реализация государственных программ

**Для цитирования:** Зайченко Н.М., Маилян Л.Р. Инновационные технологии возведения строительных объектов // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 37-43. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_37.

Original article

### INNOVATION TECHNOLOGIES OF CONSTRUCTION OBJECTS INSTALLATION

© The Author (s) 2024

**ZAICHENKO Nikolay Mikhailovich**  
doctor of technical sciences, professor  
*Donbass National Academy of Construction and Architecture*  
(Russia, Makeyevka e-mail: mailbox@donnasa.ru )

**MAILYAN Levon Rafaelovich**  
academician of the RAACS,  
doctor of technical sciences, professor  
*Russian Academy of Architecture and Building Sciences;  
Don State Technical University*  
(Russia, Rostov-on-Don, e-mail: lrm@aanet.ru)

**Abstract.** The paper summarizes the practical experience of research on modern technologies for the rapid installation of mass construction facilities from high-tech systems based on innovative lightweight thin-walled steel structures. Examples of practical implementation of scientific research in the real sector of the economy are shown. Simultaneously, a significant factor in the implementation of prefabricated technologies on mass construction sites is their complete compatibility with local raw materi-



als. This enables significant assurance of high-quality capital construction facilities and a substantial reduction in the cost of construction products.

**Keywords:** construction; technologies; local raw materials and materials; innovative technologies; prefabricated facilities; BIM; practical implementation of government programs

**For citation:** Zaichenko N.M., Mailyan L.R. Innovation technologies of construction objects installation // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 37-43. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_37.

**Введение.** На современном этапе Министерством строительства России уделяется повышенное внимание укреплению экономики РФ и инновационному развитию строительной отрасли. Решить эти задачи возможно за счет совершенствования имеющихся и создания новых производственных технологий, широкого внедрения в практику проектирования и строительства инновационных технологий возведения строительных объектов. Следует отметить, что темпы исследований и внедрения результатов инновационной деятельности в области строительства быстровозводимых зданий недостаточно высоки.

Авторами, по результатам проведенных исследований, выявлены реализованные на практике примеры возведения строительных объектов, с использованием исследуемых в настоящей работе и доказавших в реальном секторе экономики эффективность инновационных строительных технологий из легких стальных тонкостенных систем и совместно реализуемых местных материалов и ресурсов на сооружаемых объектах [1-5].

**Цель настоящего исследования** – обзор, выявление инновационных технологий для возведения строительных объектов, систематизация методологических и технологических предложений, исследование и обобщение практического опыта.

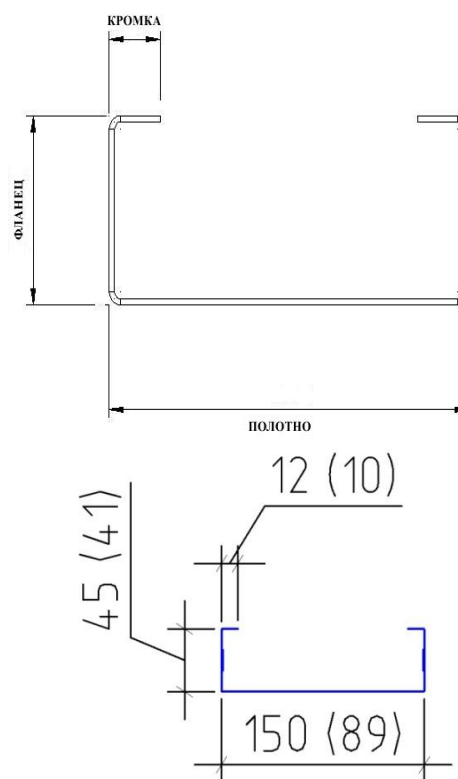
**Методология исследования.** Изучены основные технологии возведения строительных объектов, используемые строительные конструкции и применяемые материалы. Обзор и анализ публикаций, оценка степени разработанности предложений по теме исследований на этапах жизненного цикла объектов, включая:

- на подготовительном этапе – организационно-технологические исследования, анализ технико-экономических обоснований, выбор технологий проектирования и строительства объектов;
- на этапе проектирования конкурентоспособных технологий строительства объектов;
- на этапе возведения объектов капитального строительства по инновационным технологиям.

**Материалы, конструкции, результаты и обсуждение.** Инновационным технологиям возведения строительных объектов, производимым строительным материалам, конструкциям посвящено достаточное количество работ и информации, размещенной на официальных сайтах производителей и торговых площадках [6-43]. Накопленный массив информаци-

онными ресурсами требует внимательного исследования, анализа индустриальных, инновационных технологий проектирования и производства строительных конструктивных систем, адаптированных для возведения зданий, сооружений различного назначения.

В научно-исследовательских работах представлены примеры внедрения прогрессивных конструктивных систем, в части проектирования, расчетов, оптимизации затратной части конструктивных систем в период выполнения строительно-монтажных работ, сокращения сроков возведения объектов, минимизации трудовых ресурсов, задействованных на всех этапах – от проекта до внедрения инновационных технологий в возводимые строительные объекты [4-5].



С-образный профиль 150 x 45 и или 89 x 41

Рис. 1. Конструктивная система из С-образных ЛСТК [4-5; 42]

В работах представлены основные параметры и расчетные характеристики предлагаемых конструктивных систем из С-образных легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК), изготавливаемых на автоматизированных процессах производства с ис-



пользованием цифровых технологий информационного моделирования (ТИМ), которые обеспечивают высокую скорость, точность изготовления, качество изделий и снижают себестоимость выпускаемой продукции.

В качестве основного материала используются местные ресурсы и легкие стальные тонкостенные оцинкованные конструкции (ГОСТ 14918 – 020), толщиной 1–1,5 мм. Класс покрытия – цинк 275 г/м<sup>2</sup>, марка (предел текучести)–350 МПа. Конструктивная система из С-образных профилей изготавливаются, как правило, толщиной 1,0–1,6 мм; полотно – 89 или 150 мм; фланец – 41 или 45 мм; кромка 10 или 12 мм (Рис. 1).

Расчетные характеристики конструктивных систем «БИЗОН» и из С-образных ЛСТК приведены в Таблицах 1-2 [4-5; 42]. Предельные нагрузки, воспринимаемые конструктивной системой НС 260-600 «БИЗОН» из ЛСТК приведены в Таблице 3 для однопролетной и многопролетной схем нагружения [5].

Таблица 1. Расчетные характеристики конструктивных систем из С-образных ЛСТК [4-5; 42]

Наименование расчетных характеристик	Ед. изм.	Конструктивные С-образные системы						
		89 x 41 x 10			150 x 45 x 15			
		толщиной в мм						
1	2	3	4	5	6	7	8	
Предел текучести, не менее $f_y$	МПа	350	350	350	350	350	350	350
Покрытие, Zn не менее	г/мм <sup>2</sup>	275	275	275	275	275	275	275
Временное сопротивление разрыву, не менее $f_u$	МПа	420	420	420	420	420	420	420
Полотно $h$	мм	89	89	89	150	150	150	150
Фланец	мм	41	41	41	45	45	45	45
Толщина $t$	мм	1,0	1,2	1,5	1,0	1,2	1,5	1,5
Отгиб $l$	мм	10	10	10	12	12	12	12
Ширина заготовки	мм	182	182	182	253	253	253	253
Площадь	мм <sup>2</sup>	182,0	218,4	273,0	253	303,6	379,5	379,5
Момент инерции сечения $J_x$	см <sup>4</sup>	23,2	27,54	33,68	90,18	108,21	135,27	135,27
Момент инерции сечения $J_y$	см <sup>4</sup>	4,18	4,92	5,69	9,83	11,80	14,75	14,75
Радиус инерции $i_x$	см	3,56	3,54	3,54	5,97	5,98	5,97	5,97
Радиус инерции $i_y$	см	1,5	1,49	1,48	1,45	1,45	1,44	1,44
Момент сопротивления $W_x$	см <sup>3</sup>	5,137	6,03	7,56	12,02	14,43	18,04	18,04
Момент сопротивления $W_y$	см <sup>3</sup>	1,43	1,72	2,13	1,96	2,45	2,6	2,6
$Z_0$	см	1,52	1,43	1,40	1,34	1,34	1,34	1,34
Масса, м.п.	кг	1,410	1,696	2,124	1,960	2,357	2,953	2,953

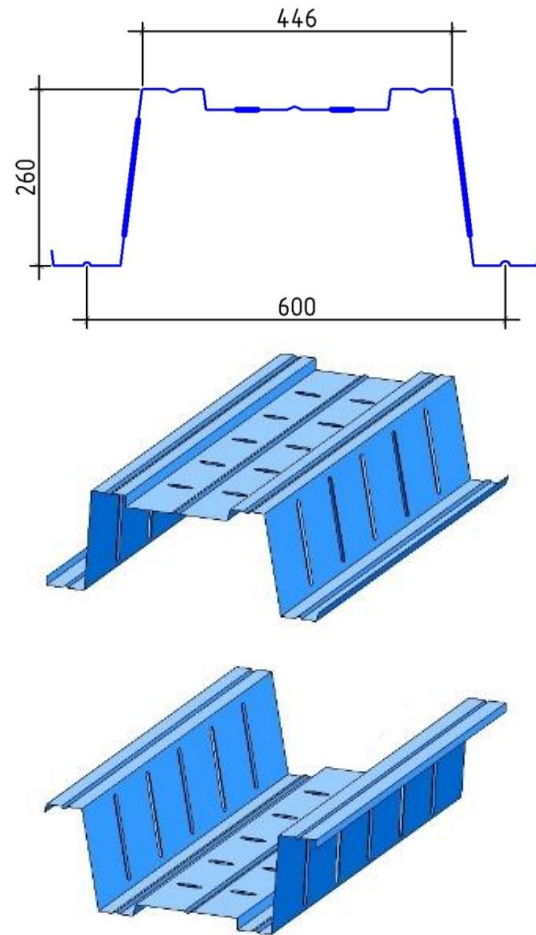


Рис. 2. Конструктивная система «БИЗОН» из ЛСТК [4-5; 42]

Таблица 2. Расчетные характеристики конструктивных систем НС 260 x 600 «БИЗОН» из ЛСТК [4-5; 42]

Наименование расчетных характеристик	Ед. изм.	Конструктивные системы НС 260 x 600, толщиной в мм					
		0,8	1,0	1,2	1,5	1,6	
		1	2	3	4	5	6
Полное сечение							
Покрытие, Zn не менее	г/м <sup>2</sup>	275	275	275	275	275	275
Предел текучести, не менее $f_y$	МПа	350	350	350	350	350	350
Временное сопротивление разрыву, не менее, $f_u$	МПа	420	420	420	420	420	420
Высота $h$	мм	260	260	260	260	260	260
Толщина $t$	мм	0,8	1,0	1,2	1,5	1,6	1,6
Отгиб $l$	мм	21	21	21	21	21	21
Ширина заготовки	мм	1250	1250	1250	1250	1250	1250
Площадь	мм <sup>2</sup>	1000,0	1250,0	1500,0	1875,0	2000,0	2000,0
Масса	кг	7,722	9,684	11,645	14,590	15,563	15,563
Момент инерции сечения $J_x$	см <sup>4</sup>	840,04	1041,28	1249,52	1539,76	1680,08	1680,08
Момент инерции сечения $J_y$	см <sup>4</sup>	3772,92	4716,15	5659,38	7074,23	7545,84	7545,84
Радиус инерции $i_x$	см	2,90	2,89	2,87	2,87	2,87	2,87
Радиус инерции $i_y$	см	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14
Момент сопротивления $W_x$	см <sup>3</sup>	53,74	66,53	79,84	99,80	107,48	107,48



Продолжение таблицы 2

Наименование расчетных характеристик	Ед. изм.	Конструктивные системы НС 260 х 600, толщиной в мм				
		0,8	1,0	1,2	1,5	1,6
1	2	3	4	5	6	7
Момент сопротивления Wx2	см <sup>3</sup>	81,16	100,61	120,73	148,77	163,91
Момент сопротивления Wy1	см <sup>3</sup>	105,98	132,48	158,98	198,72	211,96
Zo	см	10,35	10,35	10,35	10,35	10,35
Редуцированное сечение						
Покрытие, Zn не менее	г/м <sup>2</sup>	275	275	275	275	275
Предел текучести, не менее fu	МПа	350	350	350	350	350
Временное сопротивление, не менее, fu	МПа	420	420	420	420	420
Высота h	мм	260	260	260	260	260
Толщина t	мм	0,8	1,0	1,2	1,5	1,6
Отгиб l	мм	21	21	21	21	21
Ширина заготовки	мм	1250	1250	1250	1250	1250
Площадь	мм <sup>2</sup>	627	875	1160	1631	1820
Масса	кг	7,722	9,684	11,645	14,590	15,563
Момент инерции сечения Jx	см <sup>4</sup>	655,23	947,56	1237,02	1539,76	1680,08
Момент инерции сечения Jy	см <sup>4</sup>	2942,88	4291,56	5600,02	7074,23	7545,84
Радиус инерции ix	см	2,90	2,89	2,87	2,87	2,87
Радиус инерции iy	см	6,14	6,14	6,14	6,14	6,14
Момент сопротивления Wx1	см <sup>3</sup>	41,92	60,56	79,04	99,80	107,48
Момент сопротивления Wx2	см <sup>3</sup>	63,30	91,56	119,52	148,77	163,91
Момент сопротивления Wy1	см <sup>3</sup>	82,67	120,56	157,39	198,72	211,96
Zo	см	10,35	10,35	10,35	10,35	10,35

Таблица 3. Предельные нагрузки, воспринимаемые конструктивной системой НС 260-600 «БИЗОН» из ЛСТК [5]

Шаг опор, м	Конструктивные системы НС 260 х 600, толщиной в мм				
	0,8	1,0	1,2	1,5	1,6
Для однопролетной схемы нагружения конструкций					
3	2048	2961	3864	4879	5254
4	1153	1665	2174	2745	2956
5	738	1066	1391	1756	1892
<b>6</b>	<b>513</b>	<b>740</b>	<b>996</b>	<b>1220</b>	<b>1314</b>
7,2	355	514	671	847	912
7,5	328	474	618	781	841
8,4	261	377	493	622	670
9	228	329	429	487	584
Для многопролетной схемы нагружения конструкций					
3	2560	2980	4831	6098	6569
4	1442	2081	2717	3431	3694
5	923	1332	1740	2201	2365
<b>6</b>	<b>640</b>	<b>925</b>	<b>1208</b>	<b>1525</b>	<b>1642</b>
7,2	445	642	839	1059	1140
7,5	380	592	773	976	1050
8,4	327	421	616	778	838
9	285	411	537	678	730

Исследователями изучен российский опыт производства в Самарской области и практического внедрения во многие регионы Российской Федерации, включая и новые территории, инновационных строительных технологий в реальный сектор экономики [42]. Результаты исследований ЛСТК сведены в табличный вид (таблицы 1-3) для удобства решения совместных задач конструкторами и архитекторами по проектированию заданных объемно-планировочных и конструктивных систем зданий и сооружений.

География внедрения строительных технологий на более сотни объектах, которые защищены Патентами РФ [7-39], результаты исследований опубликованы в монографиях [40-41] и размещены на официальных сайтах [42-43]. Строительные технологии, конструктивные системы из ЛСТК для быстрого возведения сооружений капитального строительства из продукции полного заводского изготовления на реконструируемые и вновь строящиеся объекты различного назначения. Инновационные технологии, опыт внедрения заслуживает детального исследования и дальнейшего распространения для развития и восстановления экономики России, включая: объекты медицинского назначения (площадью 150–1500 кв. м.), быстровозводимые модули для оказания медицинской помощи нуждающимся пациентам:

- для обеспечения проведения диагностики заболеваний, методом ангиографии;
- для обеспечения диагностики послыдного исследования структуры внутренних органов методом компьютерной томографии (КТ);
- для обеспечения проведения исследования пациента методом ядерного магнитно-резонансной томографии (МРТ);
- для обеспечения исследования органов грудной клетки методом лучевой диагностики рентгенографии;
- фельдшерско-акушерские пункты, стоматологическая поликлиника в муниципальных поселениях: Волгоградской, Запорожской, Самарской, Московской, Челябинской областей, Краснодарском крае, городах Севастополь, Симферополь, Москва, Пенза, Самара, Сочи, Тольятти, Элиста;



Рис. 3. Этапы быстрого возведения экологичного здания 12 х 18 м, по заказу РЖД, г. Сызрань Самарская область, ноябрь 2024 г.



- Объекты жилья, индивидуальные и многоквартирные жилые дома: Крым, Оренбургская область (Первомайский, Ясный), Самарская область, Саратовская область, Сочи;
- Здания кафе, ресторанов, сеть торговых центров «Миндаль» – Казань, Самарская область;
- здания для размещения автосалонов, автомайки на 6–12 постов, СТО, офисы, почтовые отделения, МФЦ в: Запорожской и Оренбургской областях Луганской народной республике, городах Бузулук, Кемерово, Самара, Тольятти, Уфа;
- Здания гостиниц в – Абхазии, Башкирии, Крыму, Самарской области;
- Производственные, административные, складские объекты: Казань, Самара, Сызрань, Уфа, Новокуйбышевск, Тольятти, Чита и др. (Рис. 3 – 4).



Рис. 4. Этапы быстрого возведения экологичного здания 12 x 18 м, по заказу РЖД, г. Сызрань Самарская область, ноябрь 2024 г.

#### Конкурентные преимущества инновационных технологий строительства из ЛСТК [42-43]

1. Конкурентная цена;
2. Высокая производительность оборудования по выпуску изделий [11-13];
3. Высокая заводская готовность изделий;
4. Высокое качество продукции;
5. Конкурентные преимущества по доставке конструкций на объекты (Рис. 5).



Рис. 5. Варианты укрупненной, панельной сборки и поставки конструктивных систем

6. Высокая производительность монтажа конструкций из ЛСТК на объектах [7-39];

7. Конкурентные сроки возведения объектов [42-43].

С целью практической реализации государственных программ развития страны и повышения устойчивого роста благосостояния населения на всей территории России предлагается продолжить исследования по изучению и распространения опыта практической реализации инновационных строительных технологий.

Технологии быстрого возведения строительных объектов обеспечат оперативное исполнение Послания Президента РФ, практическую реализацию программ социально-экономического развития Донецкой, Луганской народных республик, Запорожской, Херсонской, Курской областей и оказания своевременной персональной помощи участникам СВО.

Внедрение инновационных технологий в реальный сектор экономики позволят быстро возводить необходимые объекты для решения вопросов реабилитации, предоставления медицинского и курортного лечения, оказания социальной, психологической помощи участникам СВО и их семьям. Обеспечат синергетический эффект по созданию на объектах строительства новых рабочих мест для семей участников СВО, возведению спортивных и дополнительных объектов для получения новых профессий, повышению квалификации и образованию населения России.

Предложения для внедрения. Поэтапно на новых территориях организовать практическое внедрение имеющегося в Самарской области опыта инновационных строительных технологий.

1. На старте, в порядке эксперимента. Поставка производимых в Самарской области высокой заводской готовности, импортозамещающих, высококачественных конкурентоспособных несущих и ограждающих конструктивных систем для возведения (восстановления) сооружений с применением ЛСТК – легких стальных тонкостенных конструкций, защищенных Патентами РФ.

2. Привлечение (обучение) местного населения к строительству быстровозводимых, повышенной эксплуатационной комфортности, энергоэффективных жилых зданий и объектов медицинского, спортивного, социально-культурного и бытового, сельскохозяйственного, вспомогательного и промышленного назначения.

#### Библиографический список

1. Опыт практической реализации инновационных строительных материалов и изделий / В. Т. Ерофеев, В. И. Римшин, Ю.Л. Сколубович [и др.] // Строительные материалы. – 2024. – № 8. – С. 31-39. – DOI 10.31659/0585-430X-2024-827-8-31-39. – EDN DDPCE.



2. Способы продления жизненного цикла зданий с деревянными перекрытиями / Л.Р. Маилян, Ю. Л. Сколубович, С.Н. Леонович [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.
3. Инновационные технологии строительства быстровозводимых зданий и сооружений / В. Т. Ерофеев, В. И. Римшин, Ю.Л. Сколубович [и др.] // Промышленное и гражданское строительство. – 2024. – № 8. – С. 5-13. – DOI 10.33622/0869-7019.2024.08.05-13. – EDN CXDPSN.
4. Применение нормативно-технических документов при проектировании и строительстве зданий и сооружений с использованием ЛСТК и настила армирующего "БИЗОН" / В. А. Ерышев, Г. В. Мурашкин [и др.] – Тольятти : Автономная Некоммерческая Организация "Институт судебной строительно-технической экспертизы", 2021. – 82 с. – DOI 10.51608/1206572708. – EDN YOYVHL.
5. Анпилов С. Пути прогресса и развития в науке / С. Анпилов. – Тольятти : Автономная Некоммерческая Организация "Институт судебной строительно-технической экспертизы", 2021. – 186 с. – ISBN 978-5-6044616-2-4. – DOI 10.51608/9785604461624. – EDN YTOIRW.
6. Технологические процессы в строительстве : Учебное пособие (в схемах и таблицах) для студентов очно-заочной формы обучения / В. Л. Курбатов, М. В. Дайронас, Е. Ю. [и др.] – Минеральные воды : Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2024. – 209 с. – EDN ATNATA.
7. 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.
8. 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.
9. Патент № 2818958 С1 Российская Федерация, МПК E04B 5/32. Облегчённое перекрытие : № 2023121224 : заявл. 11.08.2023 : опубл. 07.05.2024 / С. М. Анпилов, В. В. Бондарь, С. Н. Леонович [и др.]. – EDN EZGMCB.
10. Патент на промышленный образец № 101354 Российская Федерация. Опалубочный элемент : № 2016500922 : заявл. 16.03.2016 : опубл. 10.01.2017 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN EYBAVD.
11. Патент на полезную модель № 156248 U1 Российская Федерация, МПК B21D 5/08. Многоклетевой профилигоблочный стан : № 2015107766/02 : заявл. 05.03.2015 : опубл. 10.11.2015 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN WEXUNG.
12. Патент № 2586367 С1 Российская Федерация, МПК B21D 13/00. Автоматическая линия для изготовления профиля : № 2015104515/02 : заявл. 10.02.2015 : опубл. 10.06.2016 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN SKFIJ.
13. Патент № 2587701 С2 Российская Федерация, МПК B21D 5/06. Роликогибочная линия для изготовления элементов С-образного профиля для сборной каркасной конструкции из рулонной стали : № 2014143216/02 : заявл. 27.10.2014 : опубл. 20.06.2016 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN AXMHOD.
14. Патент на полезную модель № 147452 U1 Российская Федерация, МПК E04C 1/00. Сборный строительный элемент : № 2014127996/03 : заявл. 08.07.2014 : опубл. 10.11.2014 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN FVXNNX.
15. 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.
16. Патент на полезную модель № 163881 U1 Российская Федерация, МПК E04G 9/00, E04B 1/16. Опалубочный элемент : № 2016109562/03 : заявл. 16.03.2016 : опубл. 10.08.2016 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN GIGZHO.
17. Патент № 2669635 С1 Российская Федерация, МПК E04G 9/06. Опалубочный элемент сталежелезобетонных перекрытий : № 2017139847 : заявл. 15.11.2017 : опубл. 12.10.2018 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, А. Н. Китайкин. – EDN HJHQKJ.
18. Патент № 2720548 С1 Российская Федерация, МПК E04B 2/86. Несъёмная опалубочная система для крупноблочного строительства сооружений : № 2019117537 : заявл. 05.06.2019 : опубл. 12.05.2020 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, А. Н. Китайкин [и др.]. – EDN GZWWCP.
19. Патент № 2734511 С1 Российская Федерация, МПК E04B 5/40. Способ возведения большепролётных перекрытий и покрытий : № 2020118464 : заявл. 26.05.2020 : опубл. 19.10.2020 / С. М. Анпилов. – EDN TPZZWJ.
20. Патент № 2735793 С1 Российская Федерация, МПК E04C 5/08, E04B 2/86, E04G 11/00. Крупноблочный монтажный модуль и способ возведения сооружений из крупноблочных монтажных модулей : № 2020107220 : заявл. 17.02.2020 : опубл. 09.11.2020 / С. М. Анпилов. – EDN PCCNUN.
21. Патент № 2706288 С1 Российская Федерация, МПК E04B 2/86, E04H 5/02. Способ строительства сооружения : № 2019102554 : заявл. 30.01.2019 : опубл. 15.11.2019 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN FZQPNA.
22. Патент № 2652402 С1 Российская Федерация, МПК E04B 5/32. Способ возведения облегчённых перекрытий многоэтажных зданий : № 2017117403 : заявл. 18.05.2017 : опубл. 26.04.2018 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN ZEEHLF.
23. Патент № 2637248 С Российская Федерация, МПК E04B 5/19, E04B 5/10, E04B 1/30. Способ возведения большепролётных монолитных железобетонных перекрытий : № 2016136065 : заявл. 06.09.2016 : опубл. 01.12.2017 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN TTBAD5.
24. Патент № 2552506 С1 Российская Федерация, МПК E04B 2/86. Способ возведения монолитных конструкций зданий и несъёмная универсальная модульная опалубочная система : № 2014105016/03 : заявл. 11.02.2014 : опубл. 10.06.2015 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN FNUUAY.
25. Патент № 2561127 С1 Российская Федерация, МПК E04G 11/40, E04B 5/40. Несъёмная 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.
26. Патент № 2563858 С1 Российская Федерация, МПК E04B 2/84. Способ возведения монолитных стен в несъёмной опалубке : № 2014121030/03 : заявл. 23.05.2014 : опубл. 20.09.2015 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, Н. Г. Барцева [и др.]. – EDN ZFKOUX.



27. Патент № 2561135 С2 Российская Федерация, МПК Е04В 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.

28. Патент № 2795798 С1 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.].

29. Патент № 2767308 С1 Российская Федерация, МПК G21D 1/00, E04H 7/20. Атомная электрическая станция : № 2021110529 : заявл. 13.04.2021 : опубл. 17.03.2022 / С. М. Анпилов, И. Р. Гейдт, Г. С. Сахаров [и др.]. – EDN GKNMQN.

30. Патент № 2720212 С1 Российская Федерация. Атомная электрическая станция : № 2019111996 : заявл. 19.04.2019 : опубл. 28.04.2020 / С. М. Анпилов, С. М. Малинин, Г. С. Сахаров [и др.]. – EDN LLYOSN.

30. Патент № 2743372 С1 Российская Федерация, МПК Е04В 2/76. Способ монтажа внутренней стены и ограждающей перегородки : № 2020124559 : заявл. 14.07.2020 : опубл. 17.02.2021 / С. М. Анпилов. – EDN FBZUIW.

31. Патент № 2745552 С1 Российская Федерация, МПК Е04В 1/02. Способ сухого строительства энергоэффективного здания : № 2020124558 : заявл. 14.07.2020 : опубл. 26.03.2021 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, В. А. Ерышев [и др.]. – EDN ZLRZHW.

32. Патент № 2590962 С1 Российская Федерация, МПК Е04В 1/24. Способ сокращения теплотерь энергоэффективного здания : № 2014151085/03 : заявл. 16.12.2014 : опубл. 10.07.2016 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN BARLTZ.

33. Патент № 2582241 С2 Российская Федерация, МПК Е04В 1/00, Е04В 1/02, Е04С 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.

34. Патент № 2602225 С2 Российская Федерация, МПК Е04Н 5/00, F24D 3/14. Способ строительства энергоэффективных сооружений и система поддержания температуры

в сооружении : № 2014139280/12 : заявл. 29.09.2014 : опубл. 10.11.2016 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN YAZVJK.

35. Патент на полезную модель № 131752 U1 Российская Федерация, МПК Е04В 1/02, Е04Н 1/00. Энергоэффективное здание : № 2013117140/03 : заявл. 15.04.2013 : опубл. 27.08.2013 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN LIUFFI.

36. Патент на полезную модель № 165296 U1 Российская Федерация, МПК Е04В 1/24. Покрытие комфортного здания : № 2016104956/03 : заявл. 15.02.2016 : опубл. 10.10.2016 / С. М. Анпилов, В. А. Ерышев, М. М. Гайнуллин [и др.]. – EDN LRQZOZ.

37. Патент на полезную модель № 166521 U1 Российская Федерация, МПК Е04В 5/32, Е04В 5/19, Е04В 5/40. Монолитная плита перекрытия для больших пролётов : № 2016117349/03 : заявл. 04.05.2016 : опубл. 27.11.2016 / С. М. Анпилов, М. С. Анпилов. – EDN ZMJIST.

38. Анпилов, С. М. Технология возведения зданий и сооружений из монолитного железобетона / С. М. Анпилов. – Москва : Издательство АСВ, 2010. – 576 с. – ISBN 978-5-93093-590-5. – EDN QNOTVB.

39. Анпилов, С. М. Опалубочные системы для монолитного строительства / С. М. Анпилов. – Москва : Издательство АСВ, 2005. – 278 с. – ISBN 5-93093-395-2. – EDN QNLVUX.

40. Патент на полезную модель № 20332 U1 Российская Федерация, МПК Е04G 11/38. Стол опалубки для бетонирования монолитного перекрытия : № 2001110641/20 : заявл. 19.04.2001 : опубл. 27.10.2001 / С. М. Анпилов. – EDN TJITNC.

41. Патент на полезную модель № 13226 U1 Российская Федерация, МПК Е04G 21/00. Траверса для перемещения опалубки монолитных перекрытий : № 99119455/20 : заявл. 07.09.1999 : опубл. 27.03.2000 / С. М. Анпилов. – EDN QVKBIC.

42. Группа компаний ЛИСТОК : официальный сайт. – URL: <https://lstk.house/o-kompanii-listok> (дата обращения 10.11.2024).

43. ОптЛист – В2В Торговая площадка для оптовиков, поставщиков и производителей : официальный сайт URL: <https://optlist.ru/>; <https://optlist.ru/company/listok/info/besspornye-preimushchestva-lstk-pered-drugimi-stro> (дата обращения 10.11.2024).

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 11.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 11.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 624.012.3

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

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

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_44

### ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ НАПОЛНЕННЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНО-ГРАДИЕНТНЫХ ЭПОКСИДНЫХ КОМПОЗИТОВ В ДОРОЖНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

SPIN: 4522-0478

ORCID: 0009-0007-6075-5236

**ЛАНКИНА Юлия Алексеевна**

кандидат технических наук, доцент

ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»

(Россия, Саранск, e-mail: julankina@yandex.ru)

SPIN: 7494-0840

ORCID: 0000-0002-2328-6238

ScopusID: 57190161363

ResearcherID: B-1228-2017

**НИЗИНА Татьяна Анатольевна**

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»

(Россия, Саранск, e-mail: nizinata@yandex.ru)

**Аннотация.** Одной из важнейших задач любого строительства является обеспечение долговечности и износостойкости материалов конструкций, в том числе пролетных строений. Для мостовых сооружений одной из самых ответственных конструкций являются деформационные швы и их переходные зоны. В работе в качестве способа повышения прочности переходной зоны мостовых сооружений рассмотрено применение эпоксидных композитов, обладающих повышенной климатической стойкостью, что особенно актуально при применении данных материалов для укрепления переходных зон деформационных швов автомобильных дорог. В работе приведены результаты исследований в области эпоксидных композитов, обладающих повышенной стойкостью к действию УФ-облучения, а также рассмотрено влияние степени наполнения и гранулометрического состава наполнителя на экзотермичность процесса отверждения эпоксидных композитов. Предложены антиоксиданты аминного и фенольного типов, оказывающие стабилизирующее действие на эпоксидные композиты при действии УФ-облучения. Кроме того, рассмотрено влияние микрорамора (микрокальцита) – минерального карбонатного наполнителя на снижение экзотермичности реакции отверждения эпоксидного композита. В результате предложены материалы с комплексом повышенных технологических и эксплуатационных свойств, которые можно успешно применять для укрепления переходных зон деформационных швов мостовых сооружений автомобильных дорог.

**Ключевые слова:** полимерные композиты; антиоксиданты; наполнитель; микрокальцит; ИК-спектры; функционально-градиентные материалы; эпоксидная смола; степень наполнения; экзотермичность

**Для цитирования:** Ланкина Ю.А., Низина Т.А. Перспективы применения наполненных функционально-градиентных эпоксидных композитов в дорожном строительстве // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 44-49. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_44.

Original article

### PROSPECTS FOR THE APPLICATION OF FILLED FUNCTIONAL-GRADIENT EPOXY COMPOSITES IN ROAD CONSTRUCTION

© The Author(s) 2024

**LANKINA Yulia Alekseevna**

Ph.D., associate professor

National Research Ogarev Mordovia State University

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

**NIZINA Tatiana Anatolyevna**

Doctor of Technical Sciences, Professor

National Research Ogarev Mordovia State University

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

**Abstract.** One of the most important tasks of any construction is to ensure durability and wear resistance of structural materials, including span structures. For bridge structures one of the most critical structures are expansion joints and their transition zones. The paper considers the use of epoxy composites with increased climatic resistance as a way to increase the strength of



the transition zone of bridge structures. The study is especially relevant when using these materials to strengthen the transition zones of expansion joints of highways. The paper presents the results of research in the field of epoxy composites with increased resistance to UV-irradiation. The study also considers the influence of the degree of filling and granulometric composition of the filler on the exothermicity of the curing process of epoxy composites. Antioxidants of amine and phenolic types, which have a stabilizing effect on epoxy composites under the action of UV-irradiation, are proposed. In addition, the influence of micro-marble (microcalcite) — mineral carbonate filler on the reduction of exothermicity of the curing reaction of epoxy composite was considered. As a result, materials with a complex of increased technological and operational properties have been suggested, which can be successfully used for reinforcement of transition zones of expansion joints of highway bridge structures.

**Keywords:** polymer composites; antioxidants; filler; microcalcite; IR spectra; functional-gradient materials; epoxy resin; degree of filling; exothermicity

**For citation:** Lankina Yu.A., Nizina T.A. Prospects for the application of filled functional-gradient epoxy composites in road construction // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 44-49. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_44.

В современных условиях одной из важнейших задач любого строительства является обеспечение долговечности и износостойкости материалов конструкций. Для мостовых сооружений одной из самых ответственных конструкций являются деформационные швы. При этом сопряжение дорожной одежды автодороги с деформационными швами (переходная зона шириной 30 – 50 см) по всей длине выполняют из более прочного и устойчивого к воздействиям материала.

В соответствии с требованиями нормативных документов при новом строительстве, реконструкции и ремонте мостовых сооружений, в процессе которых производят укладку покрытия, на всем протяжении мостового сооружения, в узле примыкания к конструкции деформационного шва асфальтобетонное покрытие должно устраиваться «в потоке» таким же, как на всем протяжении мостового сооружения. При этом в узлах сопряжения дорожной одежды ездового полотна с конструкциями деформационных швов асфальтобетонное покрытие должно обладать повышенными показателями прочности, сдвигоустойчивости, трещиностойкости.

Для минимизации затрат на укладку дорожной одежды повышенной прочности на всем протяжении мостового сооружения применяют составы и технологии, которые позволяют укрепить покрытие в пределах переходной зоны. В настоящее время на рынке представлен ряд материалов на основе полимерных связующих, обеспечивающих повышение деформационной способности асфальтобетонного покрытия в переходной зоне примыкания деформационного шва с дорожной одеждой, но все они имеют достаточно высокую стоимость, поэтому применение для этих целей наполненных эпоксидных композитов может быть перспективным.

Научная школа Мордовского государственного университета под руководством академика РААСН, доктора технических наук Владимира Павловича Селяева уже много лет занимается вопросами повышения долговечности наполненных полимерных композитов на основе эпоксидных смол. За это время проведено множество исследований, в том числе по разработке функционально-градиентных

материалов на основе эпоксидных смол и повышению их климатической стойкости, что особенно актуально при применении данных материалов для укрепления переходных зон деформационных швов автомобильных дорог.

За годы исследований под руководством В.П. Селяева получен широкий спектр полимерных композитов на основе эпоксидных смол, обладающих повышенной стойкостью к действию климатических факторов [1 – 3]. При этом данные материалы являются функционально-градиентными, то есть имеют такое распределение свойств по высоте сечения, при котором наружный слой защищает полимер от окислительной деструкции, а внутренний слой обладает повышенными прочностными и адгезионными характеристиками.

На основе многочисленных исследований [4 – 6] были получены функционально-градиентные материалы, для которых наблюдается неравномерное распределение свойств по высоте поперечного сечения (рис. 1).

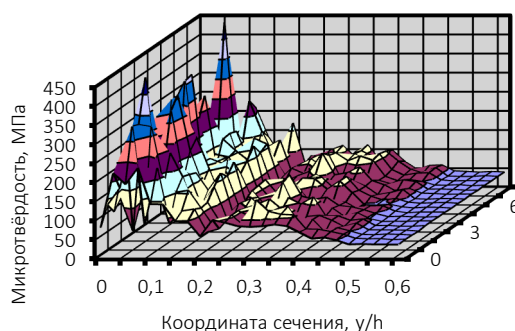


Рис. 1. Изменение микротвердости эпоксидных функционально-градиентных материалов по высоте поперечного сечения

На основе обзора литературных данных были предложены антиоксиданты аминного и фенольного типов, оказывающие стабилизирующее действие на эпоксидные композиты при действии УФ-облучения. В качестве антиоксидантов фенольного типа были использованы такие вещества, как салициловая кислота, гидрохинон, фенолфталеин. Для сравнения эффективности действия вводимых добавок использо-



вался ряд стабилизаторов промышленного производства: такие как ацетонанил, диафен, агидол-2. Наблюдение за процессом фотодеструкции материала проводили при помощи ИК-спектроскопии.

На рис. 2 приведены ИК-спектры поверхностного слоя эпоксидных композитов до и после УФ-облучения (2000 ч). Из анализа представленных данных видно, что после УФ-облучения в спектрах появилась широкая полоса поглощения в области 1640-1680  $\text{см}^{-1}$ . Поглощение в этой области характеризует присутствие иминных или амидных групп, которые образуются в результате окисления полимера. В табл. 2 представлены интенсивности этой полосы в ИК-спектрах эпоксидных композитов до и после УФ-облучения, рассчитанные с использованием полосы колебаний связей С–Н в метильных группах ( $\nu=2963 \text{ см}^{-1}$ ) в качестве внутреннего стандарта.

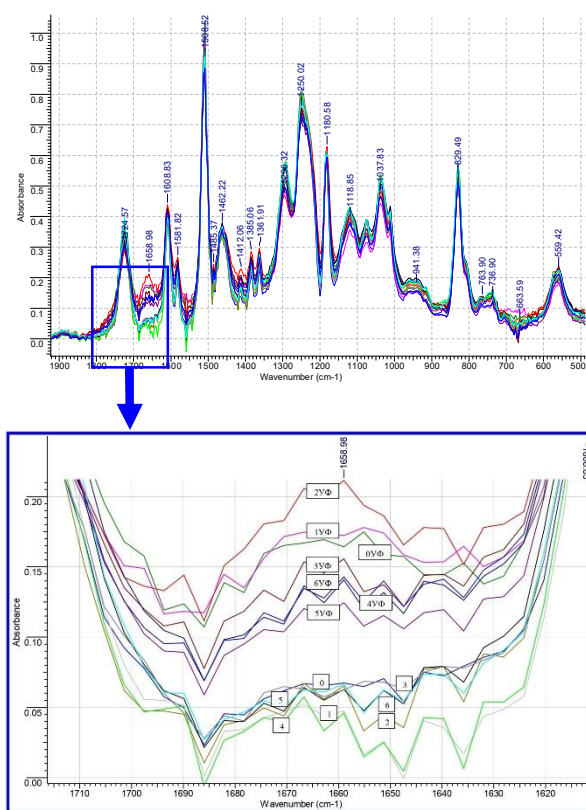


Рис. 2. ИК спектры поверхностного слоя эпоксидных композитов до и после УФ-облучения (область 500–1900  $\text{см}^{-1}$ )

Величина  $\Delta A$  при 1658  $\text{см}^{-1}$  характеризует степень фотоокислительной деструкции, поскольку связана с концентрацией иминных и амидных групп, образовавшихся в поверхностном слое полимера при УФ-облучении. Однако это справедливо только в том случае, если вводимая добавка (антиоксидант) сама не превращается в результате фотоокисления в соединение, имеющее интенсивное поглощение в этой области. Так, гидрохинон (состав 2) легко окисляется до пара-бензохинона, карбонильные группы

которого также поглощают в области 1640-1680  $\text{см}^{-1}$ . Это же относится и к ацетонанилу (состав 1), имеющему 1,2-дигидрохинолиновое кольцо, которое в условиях фотоокисления также дает сопряженные карбонильные группы, поглощающие в исследуемом интервале частот. В связи с этим для составов 1 и 2 наблюдаются завышенные значения интенсивности поглощения в области 1640-1680  $\text{см}^{-1}$ .

Таблица 2. Результаты анализа ИК-спектров эпоксидных композитов до и после УФ-облучения

№ состава	Вид антиоксиданта	Оптическая плотность поглощения при 1658 $\text{см}^{-1}$ , A		$\Delta A$ при 1658 $\text{см}^{-1}$
		до УФ-облучения	после УФ-облучения	
0	нет	0,066	0,168	0,102
1	ацетонанил	0,047	0,172	0,125
2	гидрохинон	0,065	0,212	0,147
3	фенолфталеин	0,063	0,156	0,093
4	агидол 2	0,046	0,141	0,095
5	салициловая кислота	0,063	0,124	0,062
6	диафен	0,066	0,143	0,077

Анализ полученных ИК-спектров показывает, что при введении в состав эпоксидных композитов ряда добавок антиоксидантов фотоокислительная деструкция образцов уменьшается (составы 3, 4, 5, 6). Это обусловлено защитным действием вводимых стабилизаторов.

Учитывая повышенную стойкость данных материалов к УФ-облучению и достаточно высокие прочностные характеристики, применение данных композитов на основе эпоксидных смол может быть эффективным для укрепления переходных зон деформационных швов мостовых сооружений.

Как правило, работы по устройству асфальтового покрытия, в том числе с укреплением переходных зон проводятся в летнее время при высокой температуре воздуха. При этом во время реакции взаимодействия между эпоксидной смолой и отвердителем происходит разогрев смеси свыше 200  $^{\circ}\text{C}$ . Столь сильное повышение температуры в большинстве случаев приводит к снижению качества конечного композита, развитию высоких внутренних напряжений, а также образованию дефектов в структуре полимерной матрицы в виде трещин и раковин, что в результате приводит к снижению прочностных показателей и трещиностойкости готового композита.

В последние годы научной школой кафедры строительных конструкций МГУ им. Н.П. Огарева ведутся активные исследования в области снижения экзотермичности процесса отверждения эпоксидных композитов, которое позволит повысить качество готовых изделий и конструкций [7 – 9]. Одним из возможных способов снижения экзотермичности реакции отверждения является введение в состав полимерного связующего различных наполнителей, в качестве которых в зависимости от предъявляемых

к композиционному материалу требований применяются различные волокна, тальк, слюда, каолин, мел, древесная мука, стеклянные микросферы, углеродные нанотрубки и т.д. [1, 7, 8, 10 – 12]. Одним из перспективных материалов для наполнения эпоксидных смол является микрорамор (микрокальцит) – минеральный карбонатный наполнитель, получаемый путем механического измельчения отходов природного белого мрамора и его последующей сепарации.

Данный наполнитель в настоящее время широко используется при производстве множества материалов, в том числе сухих строительных смесей и пластмасс. Это обусловлено широким перечнем его положительных характеристик – низким содержанием примесей, повышенной прочностью и твердостью зерен, низкой химической активностью, значительной стойкостью к действию ультрафиолетового излучения, атмосферных воздействий и т.д.

В работах [13 – 14] проведены результаты исследования влияния степени наполнения различных фракций микрорамора (МКМ1 – 0,5÷1 мм, МКМ2 – 0,2÷0,5 мм, МКМ3 – менее 0,2 мм) на кинетические кривые набора температуры эпоксидных композиций в процессе отверждения (степень наполнения варьировалась от 40 до 80 % от уровня предельного наполнения, зависящего от применяемой фракции микрорамора). Для оценки эффективности наполнения полученные результаты сравнивались с аналогичными характеристиками ненаполненного состава. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при повышении степени наполнения композита происходит снижение пиковой температуры экзотермической реакции (рис. 3), что, в первую очередь, связано с уменьшением доли полимерного связующего в единице объема композита.

Данные, представленные на рисунке 3, указывают на наличие практически прямой зависимости между степенью наполнения и максимальной температурой разогрева смеси исследуемых полимерных композиций. С повышением степени наполнения происходит закономерное снижение предельной температуры и повышение времени её достижения для всех исследуемых составов. Максимальное снижение температуры наполненных композитов по сравнению с контрольным составом составило порядка 30–35% (45–50 оС). Это связано с тем, что с увеличением степени наполнения, с одной стороны, происходит повышение теплопроводности композита за счёт присутствия всё большего числа частиц микрорамора. С другой стороны, снижение экзотермии процесса отверждения, несомненно, связано с уменьшением содержания связующего в единице объема полимерного композита, прежде всего, за счёт меньшего потенциально возможного числа реакций взаимодействия.

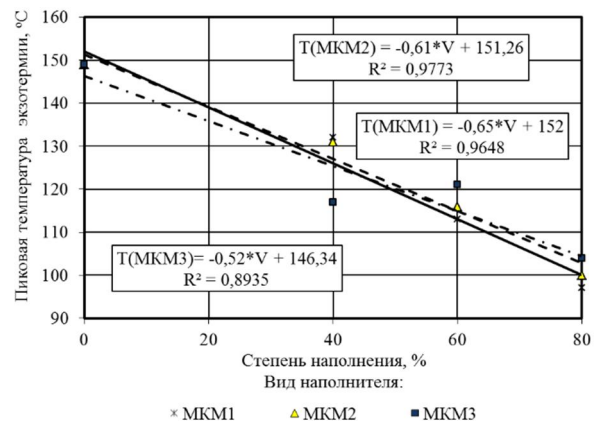


Рис. 3. Изменение пиковой температуры экзотермической реакции, протекающей при твердении эпоксидных композиций, в зависимости от степени наполнения и гранулометрического состава наполнителя (микрокальцит)

При степени наполнения 40% для состава, наполненного микрорамором МКМ3, наблюдается максимальное снижение температуры, достигающее более 30 °С. При этом для составов, наполненных МКМ1 и МКМ2, этот показатель ниже почти в 2 раза. Повышение степени наполнения до 60% приводит к увеличению времени достижения максимальной температуры разогрева смеси, в среднем, на 8–10 минут, а также к снижению максимальной температуры реакции еще на 15–20 °С. При этом значение пиковой температуры экзотермии состава, наполненного МКМ3, практически не меняется, в то время как для двух других видов наполнителей зафиксировано ее снижение почти на 20 °С. Таким образом, поскольку повышенная экзотермичность реакции представляет собой нежелательный показатель полимерного материала, на основании полученных данных можно подобрать составы, обладающие минимальной температурой разогрева смеси.

Для материалов, используемых в конструкциях деформационных швов оптимальным является одновременное сочетание таких свойств как прочность, удобоукладываемость и стойкость к действию климатических факторов, в том числе УФ-облучению. При этом стоит задача подобрать состав наполнителя, матрицы и их соотношения в полимерном композите таким образом, чтобы можно было получить материалы с заданным комплексом свойств.

При разработке таких материалов, подвергающихся одновременно интенсивному действию нагрузок и климатических факторов, целесообразно сформировать такой набор характеристик, при котором полимерный композит будет обеспечивать повышение прочности переходной зоны деформационного шва и при этом иметь повышенную стойкость к старению под действием климатических факторов, тем самым обеспечивая долговечность конструкции.



Перспективным методом регулирования свойств полимерного композита является создание эффективных материалов, повышение прочности и трещиностойкости которых можно достичь, варьируя степень наполнения и гранулометрический состав наполнителя, а введение в состав композита добавок антиоксидантов позволит существенно повысить стойкость к УФ-облучению.

Анализируя результаты проведенных исследований в области эпоксидных композитов, можно сделать вывод, что предложенные наполнители (микромрамор и антиоксиданты аминного и фенольного типов), повышающие стойкость к действию УФ-облучения и снижающие экзотермичность процесса отверждения, позволяют создать материалы с комплексом повышенных технологических и эксплуатационных свойств, которые можно успешно применять для укрепления переходных зон деформационных швов мостовых сооружений автомобильных дорог.

#### Библиографический список

1. Низина, Т. А. Защитно-декоративные покрытия на основе эпоксидных и акриловых связующих / Т. А. Низина. – Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2007. – 260 с. – ISBN 978-5-7103-1661-0. – EDN TDPYWB.
2. Ланкина, Ю. А. Разработка функционально-градиентных материалов для защитно-декоративных покрытий на основе эпоксидных смол : специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ланкина Юлия Алексеевна. – Саранск, 2007. – 239 с. – EDN NOMNBV.
3. Анализ климатической стойкости модифицированных эпоксидных полимеров в условиях умеренно-континентального климата / Т. А. Низина, Д. Р. Низин, Д. А. Артамонов [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2020. – № 1(4). – С. 33-42. – DOI 10.24411/2686-7818-2020-10005. – EDN DKNEJV.
4. Создание функционально-градиентных материалов на основе полимерных связующих / В. П. Селяев, С. И. Мартынов, Т. А. Низина [и др.] // Современное состояние и перспектива развития строительного материаловедения : Восьмые академические чтения РААСН, Самара, 20–24 сентября 2004 года / Редколлегия: Бабков В.В., Бальзанников М.И., Комохов П.Г., Коренькова С.Ф., Попов В.П. Ответственный редактор: Чумаченко Н.Г. Самарский государственный архитектурно-строительный университет. – Самара: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Самарский государственный архитектурно-строительный университет", 2004. – С. 462-465. – EDN ZIUPEN.
5. Функционально-градиентный материал для защитных покрытий / В. П. Селяев, Т. А. Низина, Ю. А. Ланкина, В. В. Цыганов // Известия Тульского государственного университета. Серия: Строительные материалы, конструкции и сооружения. – 2004. – № 7. – С. 111-116. – EDN UCSEOQN.
6. Селяев В.П. Эффективные защитные покрытия железобетонных строительных конструкций на основе функционально-градиентных материалов и интегрально-капиллярных систем / В.П. Селяев, Т.А. Низина // Новые научные направления строительного материаловедения: материалы докладов Академических чтений РААСН. – Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г.Шухова, 2005. С. 127–133.
7. Полимерные композиционные материалы. Свойства. Структура. Технологии / под ред. А.А. Берлина. СПб.: Профессия, 2009. 560 с.
8. Структура и свойства дисперсно-наполненных композиционных материалов : монография / [А. Н. Бобрышев и др.] ; М-во образования и науки Российской Федерации, Федеральное гос. бюджетное образовательное учреждение высш. проф. образования "Пензенский гос. ун-т архитектуры и стр-ва". – Пенза : Изд-во ПГУАС, 2012. – ISBN 978-5-9282-0747-2. – EDN QNFHVR.
9. Многокритериальная оптимизация составов наполненных микрокальцитом эпоксидных композитов / А. Н. Чернов, Т. А. Низина, Д. Р. Низин [и др.] // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 75-летию заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук, профессора В.П. Селяева, Саранск, 03–05 декабря 2019 года / Ответственный редактор А.Л. Лазарев. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2019. – С. 428-437. – EDN FZUIKC.
10. Оценка эффективности применения наполненных полифракционным микрокальцитом полимерных защитно-декоративных покрытий / Т. А. Низина, А. Н. Чернов, Д. Р. Низин [и др.] // Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций : Материалы XI академических чтений РААСН – Международной научно-технической конференции, посвященной памяти первого председателя научного совета РААСН "Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов", почетного члена РААСН, доктора технических наук, профессора Зайцева Юрия Владимировича, Саранск, 27–28 ноября 2020 года / Редколлегия: В.И. Травуш, В.П. Селяев, П.А. Акимов [и др.], отв. редактор А.Л. Лазарев. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2020. – С. 158-167. – EDN WKUYIJ.
11. Чернов, А. Н. Исследование совместной работы наполненных микрокальцитом полимерных покрытий с бетонными основаниями / А. Н. Чернов, Т. А. Низина, Д. Р. Низин // Молодые ученые - развитию Национальной технологической инициативы (ПОИСК). – 2020. – № 1. – С. 710-713. – EDN EUOJND.
12. Эффективность применения наполненных полифракционным микрокальцитом полимерных защитно-декоративных покрытий / А. Н. Чернов, Т. А. Низина, Д. Р. Низин [и др.] // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2020. – № 2. – С. 30-41. – DOI 10.25686/2542-114X.2020.2.30. – EDN UIBBZW.
13. Влияние гранулометрического состава микромрамора на экзотермичность и жизнеспособность наполненных эпоксидных композитов / Т. А. Низина, А. Н. Чернов, М. А. Морозов [и др.] // Долговечность строитель-



ных материалов, изделий и конструкций : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной памяти заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук, профессора Соломатова Василия Ильича, Саранск, 12–14 декабря 2016 года / Ответственный редактор: Т.А. Низина. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский

государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2016. – С. 96-102. – EDN XYFRKF.

14. Экзотермичность наполненных эпоксидных композитов / Т. А. Низина, М. А. Морозов, Д. Р. Низин, А. Н. Чернов // Региональная архитектура и строительство. – 2016. – № 3(28). – С. 68-76. – EDN WWWYOF.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 24.10.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 24.10.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 69

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

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

2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_50

**МОДЕЛЬ СПЕЦИАЛЬНОГО МАТЕРИАЛА «МИКРО/НАНО-ГИБРИДНАЯ ГИДРОФОБНАЯ ЭМУЛЬСИЯ»  
И РАЗРАБОТКА НА ЕГО ОСНОВЕ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ МОРСКОГО БЕТОНА**

© Авторы 2024

SPIN: 2514-7976

**ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич**

иностраннный академик РААСН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные материалы и технология строительства»

*РААСН; Белорусский национальный технический университет (Беларусь, Минск, e-mail: sleonovichsn@mail.ru)*

SPIN: 1041-9513

**АНПИЛОВ Сергей Михайлович**

Заслуженный изобретатель РФ, доктор

технических наук, профессор кафедры ЖБК

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Россия, Новосибирск, e-mail: anpilovsm@gmail.com)*

SPIN: 8734-8947

**САДОВСКАЯ Елена Александровна**

заведующая кафедрой «Инженерная графика строительного профиля»

*Белорусский национальный технический университет (Беларусь, Минск, e-mail: elena\_koleda@bk.ru)*

SPIN: 8387-8220

**КИМ Лев Владимирович**

кандидат технических наук, профессор, советник РААСН

*Дальневосточный федеральный университет (РФ, Владивосток, e-mail: kimlv2@yandex.ru)*

**ШАЛЫЙ Евгений Евгеньевич**

аспирант Инженерной школы

*Дальневосточный федеральный университет (РФ, Владивосток, e-mail: john\_shamali@mail.ru)*

**ПИЧИ Чао**

доктор, профессор

*Университет Цинань*

*(КНР, Цинань, e-mail: mse-zhaoq@ujn.edu.ch)*

**ДОНГ Бинг**

доктор, доцент

*Университет Цинань*

*(КНР, Цинань, e-mail: 022330104829@ujn.edu.ch)*

**ЧЕН Лидиг**

доктор, ассистент

*Университет Цинань*

*(КНР, Цинань)*

**Аннотация.** Разработана новая гидрофобная эмульсия с использованием модифицированного нанокремнезема (MNS) и полидиметилсилоксана (PDMS), а также изучен процесс приготовления эмульсии. Было исследовано влияние гидрофобной эмульсии на время схватывания, реологические свойства, прочность на сжатие и смачиваемость цементных материалов.



Кроме того, для изучения механизмов снижения потери прочности и повышения гидрофобности гидрофобных эмульсий был использован микроанализ (изометрическая калориметрия, термогравиметрический анализ, ртутная порозиметрия, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье).

Конструкции на основе цемента в особых условиях, как морская техника, водный транспорт и подземные сооружения, подвержены коррозии под воздействием  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , и  $\text{SO}_4^{2-}$ . Эти элементы способствуют коррозии стальных стержней и разрушению материалов на основе цемента [1-2]. Кроме того, в холодных регионах происходит разрушение цементных материалов под действием мороза, с погружением в воду, что серьезно влияет на долговечность и безопасность эксплуатации конструкций [3]. Присущие цементным материалам рыхлые и пористые составляющие, а также гидрофильные свойства продуктов гидратации, непосредственно влияют на их долговечность. Это представляет проблему для традиционных методов, таких как уплотнение в долгосрочном ингибировании переноса воды и солей из-за пористой природы [4].

В последнее время прогресс в технологии гидрофобной модификации, основанной на теории "эффекта листьев лотоса", позволил добиться значительных успехов в защите от коррозии. Эти разработки предлагают новые стратегии повышения долговечности цементных материалов [5-8]. Создание гидрофобных структур на поверхности цементных материалов является преобладающим методом гидрофобной модификации, включая метод покрытия [9], метод пропитки [10], метод шаблонов [11] и самосборку [12]. Основным недостатком этого метода является плохая гидрофобная стабильность, проявляющаяся в постепенном ухудшении шероховатой структуры и прочности межфазного сцепления под воздействием факторов окружающей среды в течение срока службы. Толстослойное гидрофобное покрытие представляет собой усовершенствованное решение для устранения этих проблем. Его конструктивная идея заключается в расширении двумерной гидрофобной поверхности до однородного трехмерного гидрофобного материала [13-15]. Хотя такой подход увеличивает срок службы гидрофобного покрытия, сравнение с долговечностью подложки остается сложной задачей. Более того, с увеличением толщины покрытия проблемы взаимодействия между двухслойными материалами становятся все более выраженными [16].

**Ключевые слова:** модель; специальный материал; микро/наногибридная гидрофобная эмульсия; защитный материал; морской бетон

**Для цитирования:** Модель специального материала «микро/нано-гибридная гидрофобная эмульсия» и разработка на его основе защитных материалов для морского бетона / С.Н. Леонович, С.М. Анпилов, Е.А. Садовская, Л.В. Ким, Е.Е. Шалый, Пичи Чао, Донг Бинг, Чен Лидиг // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 50-62. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_50.

Original article

## MODEL OF SPECIAL MATERIAL «MICRO/NANO HYBRID HYDROPHOBIC EMULSION» AND DEVELOPMENT OF PROTECTIVE MATERIALS FOR MARINE CONCRETES BASED ON IT

© The Author(s) 2024

**LEONOVICH Sergei Nikolaevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, foreign academician RAACS, Head of Building materials and Technology of Construction Department RAACS; Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk)

**ANPILOV Sergey Mikhailovich**

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof. Novosibirsk State Architectural and Construction University (Russia, Novosibirsk, e-mail: anpilovsm@gmail.com)

**SADOVSKAYA Elena Alexandrovna**

Head of the Department of Engineering Graphics of the Construction Belarusian National Technical University (Republic of Belarus, Minsk)

**KIM Lev Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Professor Far Eastern Federal University (Russia, Vladivostok)



**SHALY Evgeniy Evgenievich**  
PhD Candidate  
*Far Eastern Federal University*  
(Russia, Vladivostok)

**PIGI Chao**  
Doctor, Professor  
*Jinan University*  
(China, Jinan)

**DONG Bing**  
Doctor, Associate Professor  
*Jinan University*  
(China, Jinan)

**CHEN Liang**  
Doctor, Assistant  
*Jinan University*  
(China, Jinan)

**Abstract.** Developed by modified nanosilica (MNS) and polydimethylsiloxane, the effect of hydrophobic emulsion on the setting time, rheological properties, compressive strength and wettability of cementitious materials. In addition, microanalysis (isometric calorimetry, thermogravimetric analysis, mercury porosimetry, Fourier transform infrared spectroscopy) was used to study the mechanisms of reducing the strength loss and increasing the hydrophobicity of hydrophobic emulsions.

Cement-based structures in special environments such as marine engineering, water transport and underground structures are susceptible to corrosion by Cl<sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, and SO<sub>2</sub>. These elements promote corrosion of steel rods and destruction of cement-based materials. [1-2]. In addition, in cold regions, cement materials are destroyed by frost and immersion in water, which seriously affects the durability and safety of the structures. [3]. The loose and porous constituents inherent in cementitious materials, as well as the hydrophilic properties of hydration products, directly impact their durability. This poses a problem for traditional methods such as compaction in the long-term inhibition of water and salt transfer due to the porous nature [4]. Recently, advances in hydrophobic modification technology based on the theory of "lotus leaf effect" have made significant progress in corrosion protection. These developments offer new strategies to enhance the durability of cementitious materials [5-8]. The creation of hydrophobic structures on the surface of cementitious materials is the predominant method of hydrophobic modification, including the coating method [9], impregnation method [10], template method [11] and self-assembly [12]. The main drawback of this method is poor hydrophobic stability, which is manifested by the gradual deterioration of the rough structure and interfacial adhesion strength under the influence of environmental factors during the service life. Thick-layer hydrophobic coating is an improved solution to eliminate these problems. Its design idea is to expand the two-dimensional hydrophobic surface to a homogeneous three-dimensional hydrophobic material [13-15]. Although this approach increases the service life of the hydrophobic coating, the comparison with the durability of the substrate remains a challenging task. Moreover, with increasing coating thickness, the issues of interaction between two-layer materials become more pronounced [16].

**Keywords:** model; special material; micro/nano hybrid hydrophobic emulsion; protective material; marine concrete

**For citation:** Model of special material "micro/nano hybrid hydrophobic emulsion" and development of protective materials for marine concretes based on it / S.N. Leonovich, S.M. Anpilov, E.A. Sadovskaya, L.V. Kim, E.E. Shaly, Pigi Chao, Dong Bing, Chen Lianig // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 50-62. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_50.

**Введение.** В ряде исследований изучались проницаемые гидрофобные модификации [17-18], которые обладают такими преимуществами, как предотвращение сдирания покрытия, повышение гидрофобной стабильности и способность восстанавливать макротрещины. Однако эти методы по-прежнему сталкиваются с серьезными проблемами, связанными с недостаточной глубиной проникновения и сложностью формирования долгосрочного гидрофобного барьера [19].

По сравнению с поверхностной модификацией, объемная гидрофобная модификация предпо-

лагает непосредственное включение гидрофобных компонентов (таких как жирные кислоты [20] и силосаны [21]) или гидрофобных модифицированных порошков (глинистых минералов [22] и летучей золы [23]) в процесс приготовления цементных композиций. Преимуществом является то, что внутренние гидрофобные компоненты способствуют построению более полной трехмерной гидрофобной сети [24-26]. Однако недостатком этого метода является то, что для улучшения гидрофобности цементных материалов приходится сильно жертвовать их прочностью [27-28]. Прочность [29] по сравнению с обыч-



ным раствором снизилась на 56,6 %. Сонг [30] разработал супергидрофобный бетон, и прочность супергидрофобного бетона составила около 60 % от прочности обычного бетона. Силоксановые гидрофобные компоненты препятствовали раннему структурному развитию цемента в первую очередь потому, что они блокировали процесс гидратации цементных минералов [31]. Были проведены исследования по введению гидрофобной эмульсии для преодоления снижения прочности цементного материала, вызванного включением гидрофобного компонента s. Чжан [32] разработал гидрофобную эмульсию, включающую инкапсуляцию гидрофобного компонента оксидом графена, оптимизирующую механическую прочность. Музенски [33] добавил метакаолин к гидрофобным добавкам PMHS для улучшения гидрофобности и прочности на сжатие цементных композитов. Кроме того, аналогичный эффект продемонстрировало приготовление эмульсии с помощью наночастиц C-S-H [34].

Нанокремнезем (НКС), являясь ультратонким высокопуццолановым материалом с размером менее 100 нм, эффективно способствует гидратации и твердению цемента за счет эффекта кристалличности и пуццолановой активности, и в последние годы широко используется для модификации цементных материалов [35-38]. Во многих исследованиях негативное влияние других веществ на гидратацию цемента смягчалось добавлением НС. Янг и др [39] и Мухаммад и др [40] использовали НС для смягчения негативного воздействия изобутилтриэтоксисилана и органического высвобождающего агента на цементные материалы. Однако современные исследования в основном посвящены совместному добавлению НС с другими веществами, что создает проблемы в достижении однородности и оптимальных характеристик, особенно учитывая несовместимость масла и воды и агрегацию наноматериалов.

Разработана новая гидрофобная эмульсия с использованием модифицированного нанокремнезема (MNS) и полидиметилсилоксана (PDMS), а также изучен процесс приготовления эмульсии. Было исследовано влияние гидрофобной эмульсии на время схватывания, реологические свойства, прочность на сжатие и смачиваемость цементных материалов. Кроме того, для изучения механизмов снижения потери прочности и повышения гидрофобности гидрофобных эмульсий был использован микроанализ (изометрическая калориметрия, термогравиметрический анализ, ртутная порометрия, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье).

## 1. Экспериментальные исследования

### 1.1. Сырьевые материалы

В данном исследовании использовался эталонный цемент (P-I 42,5), химический состав которого представлен в таблице 1. Основные компо-

ненты гидрофобной эмульсии включают PDMS и нанокремнезем. Чистота NS составляла 99%, средний размер частиц - 20 нм, а удельная поверхность - 185,44 м<sup>2</sup>/г. Использовался ПДМС с вязкостью 40 сСт. Модифицирующая примесь НС, использованная в данном исследовании, представляла собой гексаметилдисилиламин HMDS, CH<sub>6</sub>NSi<sub>2</sub> с молекулярной массой 161,39. Во всех экспериментах использовали деионизированную (DI) воду.

Таблица 1. Химический состав цемента

Химический состав	CaO	AlO <sub>23</sub>	SO <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	FeO <sub>23</sub>	MgO	Другие	LOI
Содержание (масс.%)	63,71	4,85	2,70	20,18	3,67	2,42	1,17	1,30

### 1.2. Синтез и характеристика эмульсии MNS@PDMS

Сначала НС предварительно нагревали при 100 °С в течение 4 ч для достижения активации и охлаждали до комнатной температуры для дальнейшего использования. Затем был приготовлен модифицированный НС (МНС) путем смешивания 10 г НС и 1 г HMDS в 250 мл абсолютного этанола, и смесь перемешивали с помощью магнитной мешалки в течение 10 ч при 60 °С. Чтобы удалить HMDS без примеси, MNS трижды промывали абсолютным этанолом и DI водой. Наконец, гидрофобная эмульсия была получена путем диспергирования 10 г ПДМС в 20 г воды DI, содержащей МНС, и смесь была гомогенизирована при 10000 об/мин в течение 10 мин на водяной бане со льдом.

### 1.3. Схема эксперимента

Для реализации экспериментальной программы массовое соотношение оболочки (МНС) и ядра (ПДМС) в эмульсии варьировалось от 0,12 до 0,24, как показано в табл. 2.

Таблица 2. Схема эксперимента

Группа	МНС(r)	PDMS(r)	m/m <sub>во</sub>	DI вода (r)
№.1	1.2	10	0.12	20
№.2	1.5	10	0.15	20
№.3	1.8	10	0.18	20
№.4	2.1	10	0.21	20
№.5	2.4	10	0.24	20

Химическую реакцию между HMDS и НС анализировали с помощью ИК-спектрометра Фурье с диапазоном волн 500-4000 см<sup>-1</sup> и спектроскопии комбинационного рассеяния с диапазоном волн 2000-3500 см<sup>-1</sup>. Угол контакта с водой НС определяли методом измерения высоты. Для этого НС (или МНС) вдавливали в таблетку под давлением 15 МПа в течение 2 мин. Затем на таблетку НС (или МНС) капали 2 мкл воды, фотографировали и регистрировали с помощью измерителя угла контакта (JC2000D3A).



Гидроксильное число НС (или МНС) рассчитывали по уравнению (1):

$$N = \frac{CN_A}{SM} \times V \times 10^{-3} (1)$$

где  $N$  гидроксильное число НС (counts/nm<sup>2</sup>),  $C$  гидроксид натрия 0,1 моль/л,  $N_A$  постоянная Авогадро,  $V$  объем гидроксида натрия (мл) для повышения pH от 4,0 до 9,0,  $S$  и  $M$  удельная площадь поверхности (m<sup>2</sup>/g) и масса (g) NS. Между тем, морфология и размер эмульсии были охарактеризованы с помощью оптической микроскопии (AxioScore A1) и лазерного анализа размера частиц.

## 2. Эксперименты с цементами растворами

### 2.1. Приготовление цементного раствора

Цементный раствор был приготовлен из расчета водоцементного отношения 0,35. Гидрофобная эмульсия добавлялась в цемент в пропорциях 0%, 0,5%, 1% и 2% масляной фазы (ПДМС) по массе (под названиями Контроль, 05Н, 1Н и 2Н соответственно). Стоит отметить, что гидрофобную эмульсию необходимо предварительно смешивать с водой в течение 2 мин. Кроме того, в данном исследовании было разработано простое смешивание водного раствора, содержащего НС, с ПДМС (названное 2У), что отличалось от группы 2Н. Кроме того, количество воды для смешивания регулировалось в зависимости от дозировки эмульсии, чтобы учесть содержание воды в эмульсии. Пропорции для цементного раствора описаны в таблице 3.

Таблица 3. Рецепт цемента растворов

Группа	Цемент (г)	PDMS (г)	Вода (г)	Эмульсия (г)
Управление	500	/	175	/
05Н	500	2,5	170	7,5
1Н	500	5	165	15
2Н	500	10	155	30
2У	500	10	155	Водно-масляная смесь

### 2.2. Время схватывания

Время схватывания цементной пасты было проверено с помощью аппарата Вика с учетом китайского национального стандарта GB/T 1346-2011. Испытание времени схватывания проводилось при требовании к воде 0,26 для нормальной консистенции цементной пасты. Начальное время схватывания фиксировалось, когда расстояние между иглой Вика и плоскостью достигало  $4 \pm 1$  мм. Окончательное время схватывания фиксировалось путем поворота на 180° после испытания начального времени схватывания, оставляя отметку 0,5 мм на дне образца.

### 2.3. Реологические свойства

Реологические свойства контролировались с помощью ротационного реометра. Для испытания с постоянной скоростью сдвига в течение 0-1 мин пасту предварительно перемешивали для равномерного перемешивания, затем 20 мин выдерживали для образования ранней флокуляции, а затем пере-

мешивали со скоростью сдвига 0,03 с<sup>-1</sup> в течение 1 мин. Для испытания на динамическую скорость сдвига пасту также перемешивали в течение 1 мин при скорости 20 с<sup>-1</sup>, чтобы паста равномерно диспергировалась. После этого паста стабилизировалась в течение 2 мин. Наконец, скорость сдвига увеличивалась от 0 до 50 с<sup>-1</sup> за 1 мин и уменьшалась от 150 до 0 с<sup>-1</sup>, также за 1 мин.

### 2.4. Механическая прочность

После отверждения в течение 3 дней, 7 дней и 28 дней при температуре 20 °С и относительной влажности 90% прочность на сжатие цементного камня (20 × 20 × 20 мм<sup>3</sup>) измерялась на универсальной испытательной машине со скоростью нагружения 2 мм/мин. Среднее значение прочности на сжатие шести образцов было принято за окончательный результат прочности на сжатие.

### 2.5. Смачиваемость

Свежий участок цементного камня использовался для измерения угла контакта с помощью измерителя угла контакта после высыхания при 50 °С в течение 24 ч. Объем капли воды составлял 4 мкл. Для каждого образца было выбрано шесть точек для измерения и взяты их средние значения. Для определения прочности образцов использовали наждачную бумагу и груз массой 2 кг. Образец с грузом протаскивали по наждачной бумаге и регистрировали угол контакта с водой после определенного количества повторений. Аналогичным образом, изношенная поверхность цементной пасты была протестирована в шести точках, и среднее значение было принято за окончательный результат.

### 2.6. Изотермическая калориметрия

Анализатор тепла гидратации использовался для измерения экзотермического процесса цементной пасты при температуре 20 °С в течение 72 ч. Соотношение воды и цемента было зафиксировано на уровне 0,35.

### 2.7. Термогравиметрический анализ (ТГА)

Термогравиметрический анализатор был использован для определения содержания портландита (СН) в затвердевшей цементной пасте после сушки в вакуумной печи при 40 °С в течение 48 ч. Температура испытания варьировалась от 30 °С до 1000 °С со скоростью нагрева 10 °С/мин. Испытания проводились в атмосфере азота.

### 2.8. Ртутная парометрия

Автоматический ртутный порозиметр (PoreMaster-60) был использован для анализа структуры пор затвердевшей цементного камня. Образец толщиной 2 мм выбивался и высушивался в вакуумной печи при температуре 40 °С в течение 48 ч. Испытательная машина может создавать давление более 400 МПа, что позволяет ртути проникать в поры размером до 3 нм, в результате чего диапазон измеряемых диаметров пор составляет 3-350000 нм.



## 2.9. Инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье

Для анализа состава органических компонентов затвердевшей цементного камня использовался инфракрасный спектрометр Фурье. Высушенный образец смешивали с KBr и прессовали, чтобы получить самоподдерживающийся тонкий слой для измерения. Диапазон волн составлял  $500\text{--}4000\text{ см}^{-1}$ .

### 3. Результаты экспериментальных исследований

#### 3.1 Характеристика эмульсии MNS@PDMS

##### Модификация поверхности NS

ИК-Фурье спектры отражают молекулярную структуру органических соединений, выявляя характерные пики поглощения, которые соответствуют определенным функциональным группам в составе соединения. На рис. 1а представлен ИК-Фурье спектр NS, на котором видно, что пики поглощения растягивающих колебаний Si-O расположены при  $1105\text{ см}^{-1}$  и  $804\text{ см}^{-1}$ . Пик поглощения изгибных колебаний O-H появляется при  $1633\text{ см}^{-1}$ , а пики поглощения растягивающих колебаний Si-O-H и O-H появляются при  $3452\text{ см}^{-1}$ , что объясняется существованием гидроксильных групп, адсорбированных водой на поверхности частиц NS. Эффективная прививка HMDS характеризуется  $\text{-CH}_3$  и  $\text{-CH}_2$  пиками при  $2923\text{ см}^{-1}$  и  $2854\text{ см}^{-1}$ , соответственно. Кроме того, о прививке могут свидетельствовать результаты спектроскопии комбинационного рассеяния света (рис. 1б), показывающие, что отклик от образца NS обычно выглядит гладким и не имеет ярко выраженных пиков колебаний. По сравнению с NS, MNC демонстрирует дополнительные пики, связанные с  $\text{-CH}_3$  и  $\text{-CH}_2$  группами, которые обычно наблюдаются при  $2907\text{ см}^{-1}$ ,  $2938\text{ см}^{-1}$  и  $2965\text{ см}^{-1}$ . Этот результат еще раз подтверждает успешную модификацию NS. Кроме того,

имеет более высокое гидроксильное число и более низкий угол контакта с водой. После модификации контактный угол и гидроксильное число MNC составляют  $45,07^\circ$  и  $0,77$  отсчетов/ $\text{нм}^2$ , соответственно. Поверхностная смачиваемость MNC, определяемая углом контакта с водой, существенно влияет на тип и стабильность эмульсии. Поэтому полученный продукт MNC может быть использован для получения стабильной эмульсии. На рис. 1д показаны предлагаемые превращения при изготовлении и синтезе MNC. В данном случае, когда в качестве модификатора используется HMDS, группа  $\text{-Si(CH}_3)_3$  реагирует с группой  $\text{-OH}$  на поверхности NS, тем самым уменьшая плотность групп  $\text{-OH}$  на поверхности и реализуя гидрофобную модификацию NS.

#### 3.2. Приготовление гидрофобной эмульсии

Соотношение массы оболочки и ядра является важным фактором для стабильности эмульсии. Высокая концентрация частиц увеличивает их покрытие на поверхности капель, тем самым повышая стабильность эмульсии. Как видно из рис. 2а, при увеличении соотношения массы оболочки и ядра средний и медианный размеры частиц сначала уменьшаются, а затем увеличиваются, что согласуется с результатами предыдущих исследований. Средний минимальный размер капель может достигать  $7,88\text{ мкм}$ . Между тем, когда отношение массы оболочки к массе ядра превышает  $0,18$ , происходит флокуляция между каплями эмульсии, что приводит к увеличению вязкости системы. На рис. 2б представлены два пика в разностном объемном распределении, соответствующие соотношению масс оболочки и ядра  $0,18$  и  $0,24$ , соответственно. Это указывает на то, что меньшее соотношение масс оболочки и ядра  $0,18$  приводит к образованию более мелких капель по сравнению с теми, которые получаются при соотношении масс оболочки и ядра  $0,24$ . Эта особенность дополнительно объясняется рис. 3, где видно, что размер капель уменьшается при соотношении массы оболочки и сердцевины  $0,18$ . Однако, как показано на рис. 3с, при коалесценции двух капель они могут образовывать более крупную каплю, а оставшиеся частицы MNS диспергируются в водной фазе, что приводит к незначительной флокуляции. Это состояние можно отнести к пределу адсорбции NS на границе раздела фаз "масло - вода". С увеличением массового отношения оболочки к ядру межфазные наночастицы переходят от однослойной к многослойной адсорбции. В конечном итоге они могут диспергироваться в водной фазе и образовывать мостики между другими каплями эмульсии, что может способствовать резкому увеличению вязкости и размера частиц. Кроме того, рис. 3 иллюстрирует хорошую дисперсность капель эмульсии, указывая на то, что гидро-

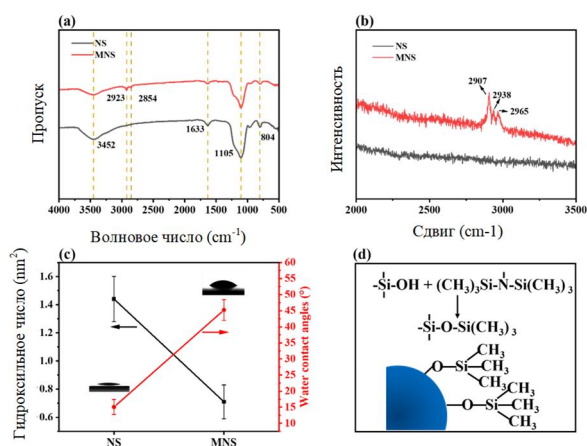


Рис. 1. Характеристика NS и MNC:

(а) ИК-Фурье спектроскопия, (б) Рамановская спектроскопия, (в) гидроксильное число и угол контакта с водой и (г) химические взаимодействия на поверхности MNC

на рис. 1с показаны гидроксильное число и угол контакта с водой NS, что свидетельствует о том, что NS

фобная эмульсия на водной основе обладает потенциалом для достижения равномерной дисперсии в композите на основе цемента.

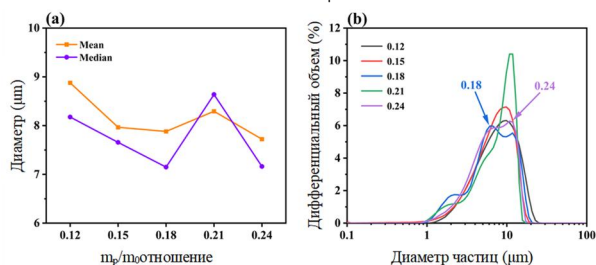


Рис. 2 Распределение частиц по размерам эмульсии с различным соотношением масс оболочки и ядра

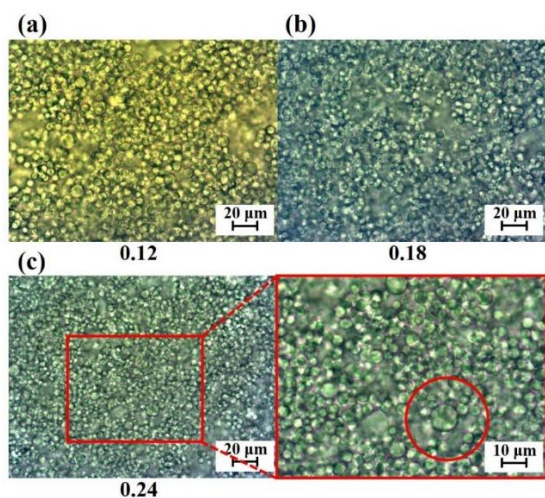


Рис. 3. Оптические микроскопические изображения эмульсии с различным соотношением масс оболочки и ядра: (а) 0,12, (б) 0,18 и (в) 0,24

### 3.3. Время схватывания

Время схватывания напрямую отражает скорость реакций гидратации цемента. На рис. 4 наглядно показано изменение начального и конечного времени схватывания цементной пасты при добавлении гидрофобной эмульсии при водопотребности 0,26. Начальное и конечное время схватывания контрольного образца составляет 195 мин и 290 мин, соответственно, что является самым коротким для каждого образца. Кроме того, низкая дозировка

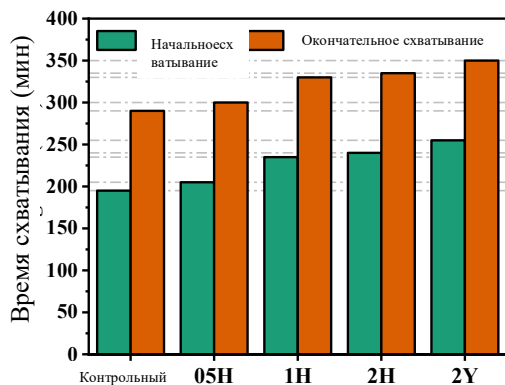


Рис. 4. Время схватывания цементной пасты

эмульсии не оказывает существенного влияния на время схватывания. В частности, по сравнению с контрольным образцом, начальное и конечное время схватывания образца 2Н составляет 240 мин и 335 мин, что представляет собой увеличение на 23,08% и 15,51%, соответственно. Напротив, начальное и конечное время схватывания добавки 2У составляет 255 мин и 350 мин соответственно, что является самым длительным значением. Данный результат свидетельствует о том, что оболочка (MNS) гидрофобной эмульсии оказывает определенное экранирующее действие на масляную фазу (PDMS), что предотвращает контакт большого количества PDMS с негидратированными частицами цемента в раннем возрасте.

### 3.4. Реологические свойства

Кажущаяся вязкость определяется на основе протокола постоянной скорости сдвига, который в основном используется для характеристики силы внутреннего трения между частицами цемента в цементной пасте. На рис. 5а показано влияние гидрофобной эмульсии на кажущуюся вязкость цементной пасты, где видно, что кажущаяся вязкость цементной пасты постепенно увеличивается с увеличением дозировки гидрофобной эмульсии. Это является следствием постепенного увеличения содержания NS и PDMS в суспензии. Также можно заметить, что 2У имеет более высокую кажущуюся вязкость, чем 2Н, что обусловлено неравномерным распределением значительного количества непокрытого ПДМС в цементной пасте.

Предел текучести - это критическое значение напряжения сдвига, представляющее собой минимальную силу, приложенную для обеспечения текучести цементной пасты. Статический предел текучести цементной пасты связан с состоянием коагуляции. Это происходит, когда внутренняя микроструктура пасты разрушается, и флокуляционная структура может противостоять деформации сдвига. До разрушения флокуляционной структуры цементной пасты напряжение сдвига постепенно увеличивается со временем, в состоянии упругой деформации. В этом состоянии паста может вернуться к исходному состоянию до деформации. Однако, когда напряжение сдвига превышает определенное критическое значение, цементная паста начинает течь. Это состояние статическим пределом текучести. Как показано на рис. 5б, при сдвиге цементного раствора с меньшей скоростью напряжение сдвига сначала увеличивается, а затем уменьшается. В результате возникает пик напряжения, который и является статическим пределом текучести. Видно, что предел текучести 2У является самым высоким, что соответствует его самой высокой вязкости. Увеличение статического предела текучести пасты, смешанной с гидрофобной эмульсией, можно объяснить быстрой реакцией



МНС в ее оболочке с портландитом (СН), в результате чего образуется более флокулирующая структура s.

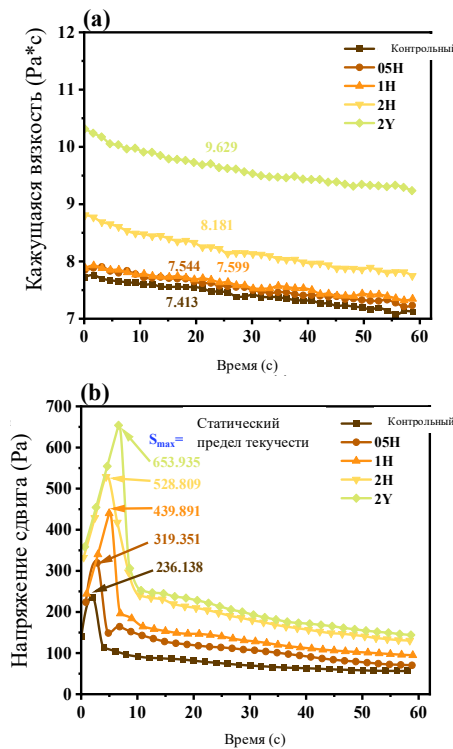


Рис. 5. Реологические свойства цементной пасты: (а) кажущаяся вязкость и (б) статический предел текучести

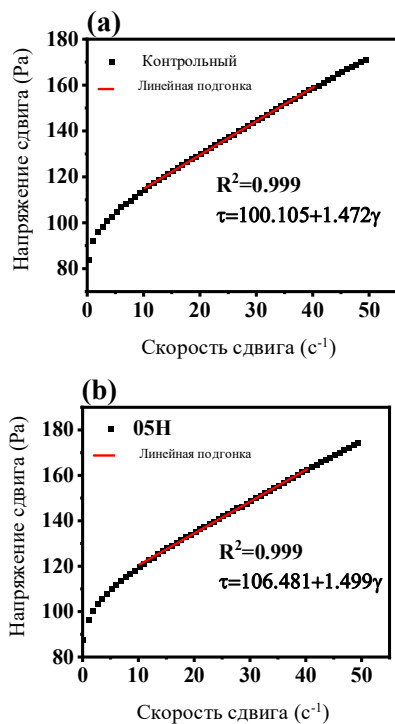


Рис. 6. Динамический предел текучести и пластическая вязкость цементной пасты по модели Бингхема (начало)

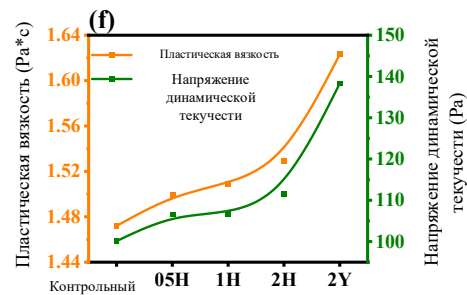
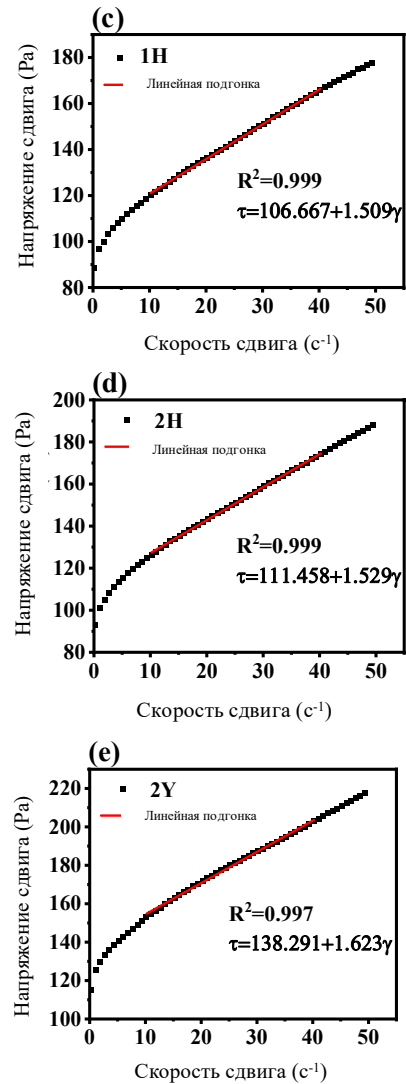


Рис. 6. Динамический предел текучести и пластическая вязкость цементной пасты по модели Бингхема

Контроль скорости сдвига проводится для измерения динамического предела текучести и пластической вязкости, которая отражает текучесть пасты под действием внешней силы. Взаимосвязь между напряжением сдвига и скоростью сдвига имеет линейный характер, о чем свидетельствуют линии подгонки кривых, построенных по модели Бингхема. На рис. 6 представлены динамический предел текучести и пластическая вязкость цемент-



ной пасты с различными дозировками гидрофобной эмульсии, что свидетельствует о постепенном увеличении динамического предела текучести и пластической вязкости. Однако увеличение 2У более значительно по сравнению с 2Н (рис. 6f), что согласуется с тенденцией изменения кажущейся вязкости и статического предела текучести.

### 3.5. Прочность на сжатие

Динамика изменения прочности при сжатии затвердевшего цементного камня с гидрофобной эмульсией представлена на рис. 7. Как отмечалось в других исследованиях, можно ожидать снижения прочности на сжатие после введения гидрофобных веществ. Из-за адсорбции гидрофобных веществ на негидратированных частицах цемента затрудняется диффузия воды и  $Ca^{2+}$ , что препятствует зарождению продуктов гидратации. Как видно из рис. 7, по сравнению с контрольным образцом, 3-дневная прочность на сжатие затвердевшей цементной пасты с 0,5%, 1% и 2% гидрофобной эмульсией составляет 50,9 МПа, 49,32 МПа и 46,06 МПа, что представляет собой снижение на 9,5%, 12,3% и 18,1%, соответственно. Кроме того, 28-дневная прочность на сжатие затвердевшего цементного камня с 0,5%, 1% и 2% гидрофобной эмульсией составляет 75,3 МПа, 71,91 МПа и 67,27 МПа, соответственно, уменьшилась на 6,1%, 10,3% и 16,1% по сравнению с контрольным образцом. Видно, что влияние гидрофобной эмульсии на прочность несколько снижается с увеличением возраста гидратации. Напротив, 3-дневная и 28-дневная прочность на сжатие 2У составляет 41,05 МПа и 58,69 МПа соответственно. По сравнению с контрольным образцом эти значения уменьшились на 27,0 и 26,8 % соответственно. Таким образом, можно сделать вывод, что при одинаковом содержании ПДМС добавление гидрофобной эмульсии оказывает меньшее влияние на прочность при сжатии.

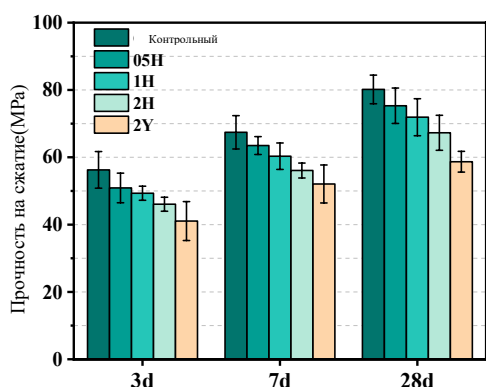


Рис. 7. Развитие прочности затвердевшей цементной пасты

### 3.5. Смачиваемость

Угол контакта с водой является ключевым показателем качества дисперсии гидрофобных веществ в цементной матрице. Более высокий угол

контакта с водой обычно отражает лучшее диспергирование, так как более эффективное диспергирование гидрофобных веществ приводит к увеличению угла контакта с водой. На рис. 8а приведен угол водного контакта затвердевшей цементного камня с различными дозировками эмульсии на 28 сутки. Видно, что в связи с тем, что цемент сам по себе является гидрофильным материалом, угол контакта контрольного образца составляет 0°. Между тем, с увеличением дозировки гидрофобной эмульсии угол контакта цемента с водой увеличивается. Когда дозировка гидрофобной эмульсии составляет 1% (т.е. образец 1Н), угол контакта с водой достигает 121,8°, что указывает на то, что образец достиг сверхгидрофобного состояния. Когда доза гидрофобной эмульсии составляет 2%, угол контакта с водой составляет 135,3°, в то время как угол контакта с водой образца 2У составляет всего 111,4°. Хотя содержание ПДМС одинаково, гидрофобная эмульсия на водной основе может лучше диспергироваться в цементной системе, а не агломерироваться, как масло. Более того, есть еще одно доказательство того, что гидрофобная эмульсия хорошо диспергируется в материале на основе цемента, как показано на рис. 8б. На рис. 8б показана гидрофобная прочность 1Н, и видно, что она сохраняет высокий угол контакта с водой (около 120°) на протяжении 30 циклов износа.

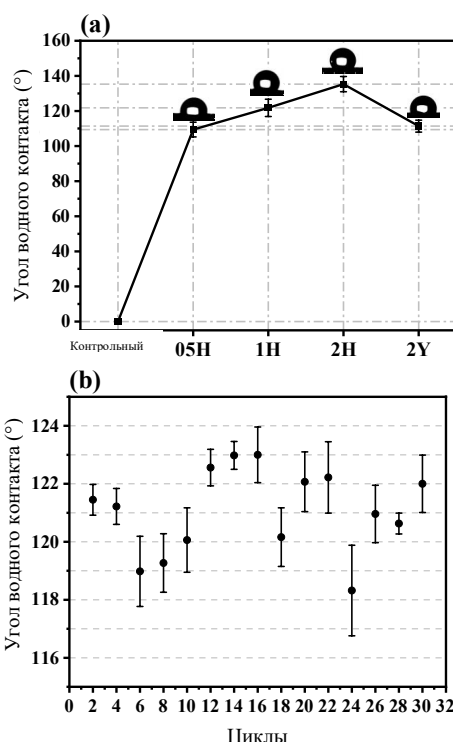


Рис. 8. Смачиваемость затвердевшей цементной пасты: (а) угол контакта с водой и (б) гидрофобная прочность

## 4. Анализ результатов экспериментальных исследований

На ранних стадиях гидратации частицы цемента выделяют тепло по мере протекания реакции. Тепло, выделяемое во время гидратации в раннем возрасте, и время его появления на каждой стадии процесса реакции играет важную роль в структуре и свойствах затвердевшего цемента. Как показано на рис. 9, добавление гидрофобной эмульсии может несколько продлить период ускорения гидратации цементной пасты, что может быть связано с неизбежным присутствием небольшого количества остаточного непокрытого ПДМС. Между тем, это также может быть связано с экранирующим эффектом МНС, который предотвращает значительное влияние инкапсулированного ПДМС на задержку гидратации цемента, а хорошо диспергированный МНС может также играть роль нуклеатора. Действительно, ПДМС может адсорбироваться на поверхности негидратированных частиц цемента на ранних стадиях, а его длинноцепочечная структура может образовывать гидрофобную пленку, препятствуя процессу реакции гидратации. Как показано на примере образца 2У, ПДМС без покрытия значительно замедляет период ускорения гидратации, а суммарное выделение тепла после 3 дней гидратации составляет 187,56 Дж/г, что ниже, чем 192,55 Дж/г у контрольного образца.

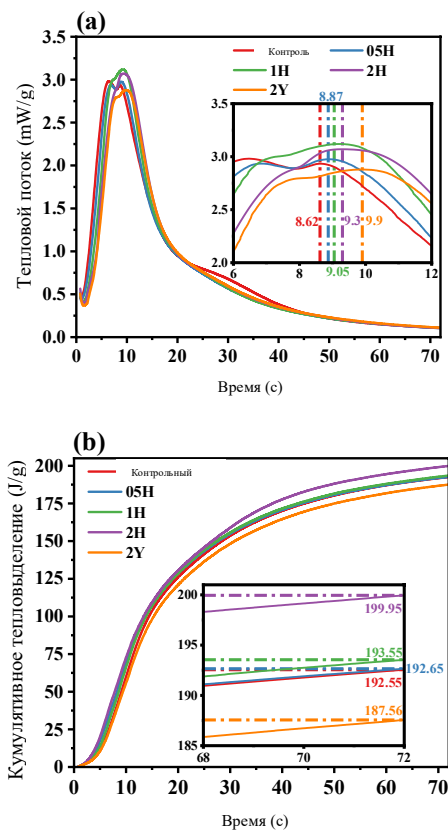


Рис. 9. Тепловой поток и кумулятивное тепловыделение цементной пасты

Из ИК-Фурье спектра видно, что включение ПДМС приводит к изменению состояния химических связей в материалах на основе цемента. Как показано на рис. 10, характерные пики -ОН (возникший в СН) и воды в системе появляются при 3644 см<sup>-1</sup> и 3430 см<sup>-1</sup>, соответственно, а пик изгибных колебаний Si-OH появляется при 971 см<sup>-1</sup>. Между тем, с увеличением дозировки гидрофобной эмульсии, характерные пики гидрофобной функциональной группы -CH<sub>3</sub> и Si-CH<sub>3</sub> при 2971 см<sup>-1</sup> и 1255 см<sup>-1</sup> становятся более очевидными, что обусловлено увеличением содержания PDMS. Однако характерные пики в ИК-Фурье спектре образцов группы 2У менее очевидны по сравнению с образцами группы 2Н. Спектр ИК-Фурье может косвенно отражать дисперсию ПДМС в материалах на основе цемента. Когда ПДМС обволакивается МНС, образуется водорастворимая эмульсия, которая равномерно диспергируется в цементной системе, что приводит к хорошей гидрофобности образца. Напротив, без экранирования МНС слабополярным молекулам ПДМС и сильнополярным молекулам воды трудно связываться друг с другом, что приводит к снижению угла контакта с водой 2У.

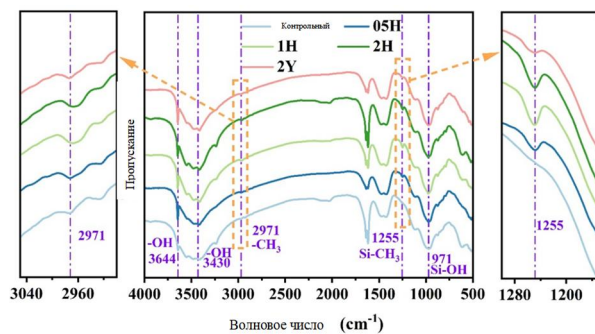


Рис. 10. FTIR картина затвердевшей цементной пасты на 28 сутки

Продукты гидратации, охарактеризованные с помощью ТГ-измерений в цементной пасте на 3 и 28 сутки, представлены на рис. 11. СН является одним из основных продуктов гидратации в материалах на основе цемента. Эндотермический пик в диапазоне 420-500 °С соответствует разложению СН. Более того, от 70°C до 230 °С, четкий бимодальный пик появляется в схеме, один соответствует распаду AFt и C-S-H фаз, а другой является распадом AFm фазы. А потеря массы в температурном диапазоне 600-770 °С представляет собой декарбонизацию CaCO<sub>3</sub>. Содержание химически связанной воды и СН рассчитывается по уравнению (2) и уравнению (3):

$$m_{water} = m_1 + m_2 + m_3 \frac{M_{H_2O}}{M_{CO_2}} \quad (2)$$

$$m_{CH} = m_2 \frac{M_{CH}}{M_{H_2O}} + m_3 \frac{M_{CH}}{M_{CO_2}} \quad (3)$$

где  $m_{water}$  и  $m_{CH}$  содержание химически связанной воды и СН (%),  $m_1$ ,  $m_2$  и  $m_3$  потери массы в диапа-



зоне температур 70-230 °С, 420-500 °С и 600-770 °С, соответственно,  $M_{H_2O}$ ,  $M_{CH}$  и  $M_{CO_2}$  относительная молекулярная масса  $H_2O$ ,  $CH$  и  $CO_2$ .

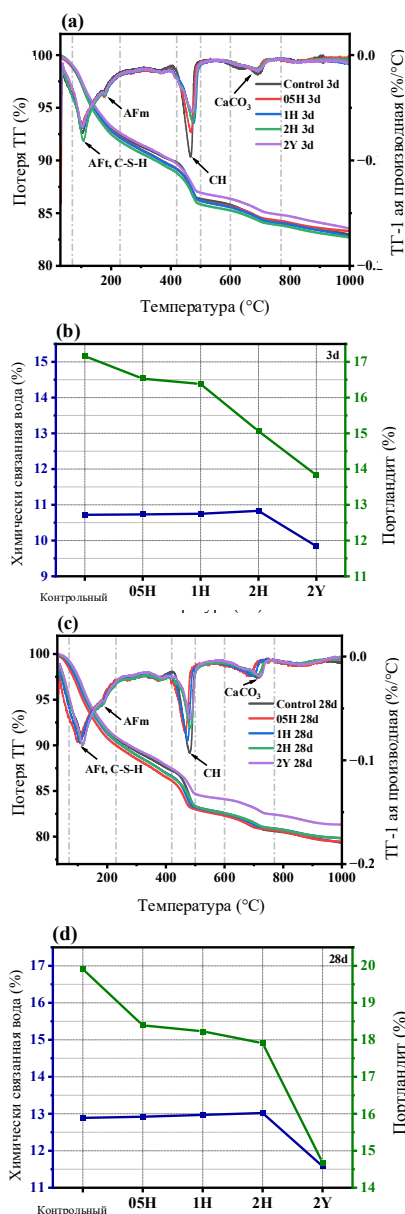


Рис. 11. Схема ДТГ-ТГ затвердевшего цементного камня: (а), (б) 3-дневная и (в), (г) 28-дневная.

Хорошо видно, что с увеличением дозировки гидрофобной эмульсии содержание химически связанной воды незначительно увеличивается, как на 3 сутки, так и на 28 суток. Более того, образование СН имеет противоположную тенденцию. При капельной морфологии МНС, инкапсулированного в ПДМС, МНС проявляет пуццолановый эффект, реагируя с СН в цементе для образования большего количества С-S-Н, что согласуется с результатами анализа DTG-TG. Количество СН в контрольной группе и группе 2Н составляет 19,91% и 17,91%, соответственно, через 28 дней, а содержание химически связанной воды -

10,72% и 10,83%, соответственно. Однако образование СН, AFt и С-S-Н в образце 2Y ниже, чем в контрольном образце, и значительно ниже по сравнению с образцами 2Н, как через 3 дня, так и через 28 дней. В образце 2Y немодифицированные НС не обладают способностью адсорбироваться вокруг ПДМС, в результате чего ПДМС непосредственно адсорбируется на частицах цемента и задерживает его гидратацию. Однако в образце 2Н МНС могут блокироваться между ПДМС и частицами цемента, позволяя частицам цемента пройти реакцию гидратации, одновременно расходуя свои собственные реакции с частицами цемента. Это можно назвать жертвенным эффектом МНС.

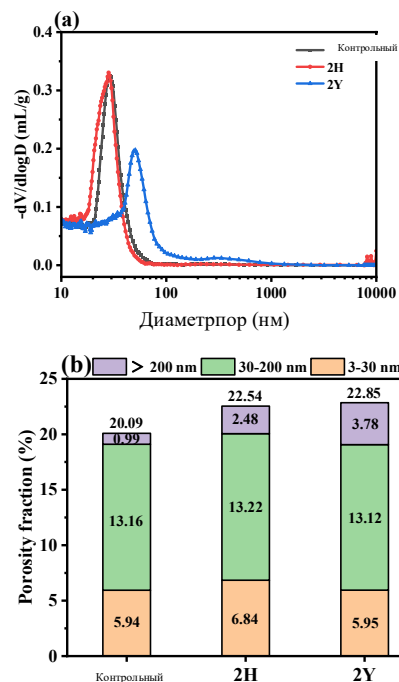


Рис. 12. Структура пор затвердевшей цементной пасты на 28 сутки:

(а) распределение пор по размерам и (б) доля пористости

Влияние гидрофобной эмульсии на структуру пор затвердевшего цементного камня может быть получено с помощью теста МР. Чтобы подчеркнуть роль МНС в данном исследовании, испытания на структуру пор проводились только на образцах контрольный, 2Н и 2Y, как показано на рис. 12. Как видно из рис. 12а, кривая распределения пор по размерам образца 2Н похожа на кривую контрольного образца, что указывает на то, что эмульсия МНС@PDMS может быть равномерно распределена в цементе. Однако кривая 2Y не только значительно смещается вправо, указывая на увеличение наиболее вероятного размера пор, но и демонстрирует изменение формы пика, что вызвано неравномерным распределением ПДМС в цементной пасте. На рис. 12b поры в затвердевшей цементной пасте разде-



лены на гелевые поры (3-30 нм), капиллярные поры (3-200 нм) и макропоры (>200 нм). Видно, что объемная доля макропор в образцах Контроль, 2Н и 2У последовательно увеличивается. Увеличение объема макропор в образце 2У связано в первую очередь с тем, что ПДМС вмешивается и вносит крупные дефекты из-за морфологии масляных капель. Однако в присутствии MNS MNS продемонстрировал, что его эффект заполнения может частично компенсировать дефекты, вызванные PDMS, и увеличение объема макропор для 2Н происходит в основном за счет размера его собственной эмульсии, как показано на рис. 3с. Между тем, изменения в структуре пор также подтверждают снижение прочности на сжатие, о котором говорилось ранее.

**Заключение.** Разработана новая гидрофобная эмульсия с использованием модифицированного нанокремнезема (MNS) и полидиметилсилоксана (PDMS), а также изучен процесс приготовления эмульсии. Было исследовано влияние гидрофобной эмульсии на время схватывания, реологические свойства, прочность на сжатие и смачиваемость цементных материалов. Кроме того, для изучения механизмов снижения потери прочности и повышения гидрофобности гидрофобных эмульсий был использован микроанализ (изометрическая калориметрия, термогравиметрический анализ, ртутная порометрия, инфракрасная спектроскопия с преобразованием Фурье).

#### Библиографический список

1. Y. Yi, D. Zhu, S. Guo, Z. Zhang, C. Shi, Обзор ухудшения и подходов к повышению долговечности бетона в морской среде, *Cem. Concr. Compos.* 113 (2020) 103695. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>.
2. H. Justnes, M.O. Kim, S. Ng, X. Qian, Методика расчета требуемого коэффициента диффузии хлоридов для предполагаемого срока службы как функции бетонного покрытия в армированных морских конструкциях, *Cem. Concr. Compos.* 73 (2016) 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.006>.
3. P. Zhang, F.H. Wittmann, M. Vogel, H.S. Müller, T. Zhao, Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete, *Cem. Concr. Res.* 100 (2017) 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.018>.
4. W. She, J. Yang, J. Hong, D. Sun, S. Mu, C. Miao, Супергидрофобный бетон с повышенной механической прочностью: Наногибридные композиты, механизм укрепления и оценка долговечности, *Constr. Build. Mater.* 247 (2020) 118563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118563>.
5. J. Yang, W. Zuo, S. Wei, Towards a further understanding of cement hydration at the early-age stage in presence of hydrophobic silane IBTEO, *Cem. Concr. Compos.* 153 (2024) 105712. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105712>.
6. Y. Pang, H. Wang, Q. Tang, L. Yang, Q. Wang, Повышение гидрофобности цементного раствора против сульфатного воздействия сухого мокрого цикла с использова-

нием порошка слюды, модифицированного стеариновой кислотой, путем высокотемпературного перемешивания, *Constr. Build. Mater.* 441 (2024) 137556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137556>.

7. Y. Chen, R. Wang, H. Wang, F. Hu, P. Jin, Study on PVA-siloxane mixed emulsion coats for hydrophobic cement mortar, *Prog. Org. Coat.* 147 (2020) 105775. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105775>.

8. M.S. Hossain, V. Panov, S. Choi, J.B. Kim, K.K. Yun, Характеристики долговечности цементного раствора с добавлением водоотталкивающих примесей, *Constr. Build. Mater.* 440 (2024) 137262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137262>.

9. W. She, X. Wang, C. Miao, Q. Zhang, Y. Zhang, J. Yang, J. Hong, Biomimetic superhydrophobic surface of concrete: Topographic and chemical modification assembly by direct spray, *Constr. Build. Mater.* 181 (2018) 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.063>.

10. R. Li, P. Hou, N. Xie, Z. Ye, X. Cheng, S.P. Shah, Design of SiO<sub>2</sub>/PMHS hybrid nanocomposite for surface treatment of cement-based materials, *Cem. Concr. Compos.* 87 (2018) 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.008>.

11. P. Liu, Y. Gao, F. Wang, J. Yang, X. Yu, W. Zhang, L. Yang, Superhydrophobic and self-cleaning behavior of Portland cement with lotus-leaf-like microstructure, *J Clean Prod.* 156 (2017) 775-785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.211>.

12. И. Флорес-Вивиан, В. Хеджази, М.И. Кожухова, М. Носоновский, К. Соболев, Самособирающиеся частицы-силоксановые покрытия для супергидрофобного бетона, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 5 (2013) 13284-13294. <https://doi.org/10.1021/am404272v>.

13. C. Li, Y. Sun, M. Cheng, S. Sun, S. Hu, Fabrication and characterization of the TiO<sub>2</sub>/polysiloxane resin composite coating with full-thickness super-hydrophobicity, *Chem. Eng. J.* 333 (2018) 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.165>.

14. И. Торун, М. Рузи, Ф. Эр, М.С. Онсес, Супергидрофобные покрытия из биосовместимого полидиметилсилоксана и натурального воска, *Prog. Org. Coat.* 136 (2019) 105279. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105279>.

15. F. Wang, T. Xie, S. Lei, J. Ou, W. Li, M. Xue, D. Huang, Preparation and properties of foundry dust/Portland cement based composites and superhydrophobic coatings, *Constr. Build. Mater.* 246 (2020) 118466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118466>.

16. L. Guo, S. Huang, L. Zhang, P. Jia, The interface crack problem for a functionally graded coating-substrate structure with general coating properties, *Int. J. Solids Struct.* 146 (2018) 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.03.025>.

17. D.A. Kagi, K.B. Ren, Снижение водопоглощения в бетоне, обработанном силикатами, путем последующей обработки катионными поверхностно-активными веществами, *Build. Environ.* 30 (1995) 237-243. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)00047-v](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00047-v).

18. Y. Zhu, S. Kou, C. Poon, J. Dai, Q. Li, Influence of silane-based water repellent on durability properties of recycled aggregate concrete, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008>.

19. F. Tittarelli, G. Moriconi, Сравнение между поверхностной и объемной гидрофобной обработкой против



- коррозии оцинкованной арматуры в бетоне, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 609-614. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.011>.
20. L. Lei, Q. Wang, S. Xu, N. Wang, X. Zheng, Изготовление супергидрофобного бетона, используемого в морской среде, с антикоррозионными и стабильными механическими свойствами, *Constr. Build. Mater.* 251 (2020) 118946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118946>.
21. J. Carette, B. Delsaute, N. Milenković, J. Lecomte, M. Delplancke, S. Staquet, Расширенная характеристика поведения сыпучих гидрофобных растворов в раннем возрасте, *Constr. Build. Mater.* 267 (2021) 120904. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120904>.
22. R. Kalpokaitė-Dičkuvienė, S.I. Lukošūtė, A. Baltušnikas, J. Čėsniėnė, Structural observation of cement paste modified with hydrophobic organoclay, *Constr. Build. Mater.* 272 (2021) 121931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121931>.
23. P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, Изготовление самоочищающегося материала из золы/политетрафторэтилена для распыления цементного раствора, *JCleanProd.* 264 (2020) 121748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121748>.
24. F. Wang, S. Lei, J. Ou, W. Li, Влияние PDMS на гидроизоляционные характеристики и коррозионную стойкость цементного раствора, *Appl. Surf. Sci.* 507 (2020) 145016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145016>.
25. S. Muzenski, I. Flores-Vivian, K. Sobolev, Durability of superhydrophobic engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.014>.
26. S. Muzenski, I. Flores-Vivian, K. Sobolev, Hydrophobic modification of ultra-high-performance fiber-reinforced composites with matrices enhanced by aluminum oxide nano-fibers, *Constr. Build. Mater.* 244 (2020) 118354. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118354>.
27. Z. Feng, F. Wang, T. Xie, J. Ou, M. Xue, W. Li, Интегральный гидрофобный бетон без использования силана, *Constr. Build. Mater.* 227 (2019) 116678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116678>.
28. B. Dong, F. Wang, H. Abadikhah, L. Hao, X. Xu, S.A. Khan, G. Wang, S. Agathopoulos, Simple Fabrication of Concrete with Remarkable Self-Cleaning Ability, Robust Superhydrophobicity, Tailored Porosity, and Highly Thermal and Sound Insulation, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 11 (2019) 42801-42807. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b14929>.
29. W. Wang, S. Wang, D. Yao, X. Wang, X. Yu, Y. Zhang, Fabrication of all-dimensional superhydrophobic mortar with enhanced waterproof ability and freeze-thaw resistance, *Constr. Build. Mater.* 238 (2020) 117626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117626>.
30. J. Song, D. Zhao, Z. Han, W. Xu, Y. Lu, X. Liu, B. Liu, C.J. Carmalt, X. Deng, I.P. Parkin, Super-robust superhydrophobic concrete, *J. Mater. Chem. A.* 5 (2017) 14542-14550. <https://doi.org/10.1039/c7ta03526h>.
31. X.M. Kong, H. Liu, Z.B. Lu, D.M. Wang, The influence of silanes on hydration and strength development of cementitious systems, *Cem. Concr. Res.* 67 (2015) 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.008>.
32. Y. Zhang, L. Chen, Z. Liu, W. Li, S. Hong, G. Zhu, B. Dong, Производство интегрального гидрофобного бетона (ИНС) с использованием эмульсии Пикеринга с ограниченным влиянием на механическую прочность, *Constr. Build. Mater.* 312 (2021) 125319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125319>.
33. S. Muzenski, I. Flores-Vivian, K. Sobolev, Hydrophobic engineered cementitious composites for road applications, *Cem. Concr. Compos.* 57 (2015) 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.009>.
34. J. Zhang, B. Mei, Y. Zhang, G. Pan, Y. Zhang, H. Qiao, M. Shang, L. Yang, X. Xie, S. Zhai, Hierarchical bio-inspired design and fabrication of all-dimensional superhydrophobic ultra-lightweight high-volume fly ash cement foams using novel ultrasonic-assisted siloxane-encapsulated pickering emulsions, *Compos. Part B-Eng.* 282 (2024) 111581. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111581>.
35. D.P. Bentz, A.S. Hansen, J.M. Guynn, Оптимизация размеров частиц цемента и летучей золы для получения устойчивых бетонов, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 824-831. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.008>.
36. J. Lapeyre, A. Kumar, Влияние пуццолановых добавок на механизмы гидратации трикальцийсиликата, *J. Am. Ceram. Soc.* 101 (2018) 3557-3574. <https://doi.org/10.1111/jace.15518>.
37. P. Hou, S.H. Kawashima, K. Wang, D.J. Corr, J. Qian, S.P. Shah, Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.027>.
38. A. Ramezaniapour, M. Mortezaei, S. Mirvalad, Synergic effect of nano-silica and natural pozzolans on transport and mechanical properties of blended cement mortars, *Journal of Building Engineering.* 44 (2021) 102677. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102677>.
39. J. Yang, W. She, W. Zuo, K. Iyu, Q. Zhang, Рациональное применение нано-SiO<sub>2</sub> в цементных пастах с добавлением силана: уравнивающие и синергетические эффекты, *Cem. Concr. Compos.* 118 (2021) 103959. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103959>.
40. F. Muhammad, P. Hou, Z. Wang, X. Zhou, X. Cheng, The counterbalance of the adverse side effects of releasing agent on properties of cementitious materials with nano-particles, *Cem. Concr. Compos.* 125 (2022) 104300. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104300>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 13.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 13.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья  
УДК 625 7/8  
ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_63

**ПРИМЕНЕНИЕ АСФАЛЬТОГРАНУЛОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ ДЛЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И РЕМОНТА  
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ В ДЕМОКРАТИЧЕСКОЙ РЕСПУБЛИКЕ КОНГО**

© Авторы 2024  
SPIN: 8064-4511

**МАКАЯ Лионель Мавунгу**  
аспирант  
*Тамбовский государственный технический университет*  
(Россия, Тамбов, e-mail: [gsiad@mail.tambov.ru](mailto:gsiad@mail.tambov.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](mailto:konst-68@yandex.ru))

SPIN: 4118-5150

**ЗУБКОВ Анатолий Федорович**  
доктор технических наук, профессор, кафедра «Городское строительство  
и автомобильные дороги»  
*Тамбовский государственный технический университет*  
(Россия, Тамбов, e-mail: [afzubkov2013@yandex.ru](mailto:afzubkov2013@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](mailto:monastyrev68@mail.ru))

**Аннотация.** Представлены результаты исследования характеристик асфальтогранулобетона, получаемого при холодном фрезеровании покрытий нежесткого типа в Демократической Республике Конго (ДРК) и Российской Федерации (РФ). Установлено, что в ДРК отсутствуют нормативные требования к применению отходов холодного фрезерования асфальтобетонных покрытий при ремонте и реконструкции автомобильных дорог. Проведенный анализ результатов испытания образцов асфальтогранулята, полученных в ДРК и РФ показал, что по своим параметрам они соответствуют предъявляемым требованиям к материалу для устройства дорожных одежд. С учетом полученных результатов исследования установлено, что технологию устройства дорожных одежд с применением асфальтогранулобетонных смесей можно использовать в ДРК.

**Ключевые слова:** дорожное покрытие; асфальтогранулобетон; вяжущее; прочность; Конго; строительство и ремонт автомобильных дорог

**Для цитирования:** Применение асфальтогранулобетонных смесей для строительства и ремонта автомобильных дорог в Демократической Республике Конго / Л.М. Макая, К.А. Андрианов, А.Ф. Зубков, П.В. Монастырев // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 63-69. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_63.

Original article

**THE USE OF ASPHALT-GRANULOCRETE MIXTURES FOR THE CONSTRUCTION AND REPAIR OF AUTOMOBILE ROADS  
IN THE DEMOCRATIC REPUBLIC OF THE CONGO**

© The Author(s) 2024

**MAKAYA Lionel Mavungu**  
PhD Candidate  
*Tambov State Technical University*  
(Russia, Tambov, e-mail: [mirsayapovit@mail.ru](mailto:mirsayapovit@mail.ru))



**ANDRIANOV Konstantin Anatolyevich**

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov, e-mail: konst-68@yandex.ru)

**ZUBKOV Anatoly Fedorovich**

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

**MONASTYREV Pavel Vladislavovich**

Corresponding Member of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute «Architecture, Construction and Transport» RAASN; Tambov State Technical University  
(Russia, Tambov, e-mail: monastyrev68@mail.ru)

**Abstract.** The findings of a study on the characteristics of asphalt granular concrete obtained through cold milling of non-rigid coatings in the Democratic Republic of the Congo (DRC) and the Russian Federation (RF) are presented. It has been established that in the DRC there are no regulatory requirements for the use of waste from cold milling of asphalt concrete pavements in the repair and reconstruction of automobile roads. The analysis of the test results of asphalt granulate samples obtained in the DRC and the Russian Federation showed that, in terms of their parameters, they meet the requirements for the material for the device of road construction. Considering the results of the study, it was found that the technology of paving with the use of asphalt granular concrete mixtures can be used in the DRC.

**Keywords:** road pavement; asphalt granular concrete; binder; strength; Congo; construction and repair of automotive roads

**For citation:** The use of asphalt-granulocrete mixtures for the construction and repair of automobile roads in the Democratic Republic of the Congo / L.M. Makaya, K.A. Andrianov, A.F. Zubkov, P.V. Monastyrev // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 63-69. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_63.

**Введение.** В центральной части Африканского континента расположена Демократическая Республика Конго, занимающая территорию площадью 2,3 млн. км<sup>2</sup> с населением свыше 71 млн. чел. Территория страны представляет из себя плато, в средней части которой находится впадина Конго, а по краям – замкнутое кольцо возвышенностей. Из-за сложности ландшафта и климатических условий распределение населенных пунктов по территории страны неравномерно и представляет большие сложности для строительства автомобильных дорог. Климат республики относится к экваториальному, постоянно влажный, в южной половине и в северной части субэкваториальный.

Температура воздуха находится в пределах от 18 до 36°C, при выпадении осадков в определенные периоды года от 200 до 250 мм в месяц. Выпадение осадков неравномерно, так в экваториальной зоне выпадение осадков достигает 1700-2200 мм в год. Более половины территории республики покрыто тропическими лесами.

Развитие промышленности, расширение экономических, научных и культурных связей между африканскими государствами требует создания международной дорожной инфраструктуры, связанной со строительством новых и реконструкции существующих автомобильных дорог [1].

В настоящий момент в республике построено свыше 81 тыс. км автомобильных дорог, из которых только 3% имеют твердое покрытие, остальная часть дорог относится к грунтовым дорогам. По функциональному назначению дороги разделены на автомагистрали (индекс «А»), национальные (индекс «N») и департаментальные (индекс «D»). В качестве критерия при выборе геометрических параметров автомобильной дороги, согласно стандарта NFP98-86-2011, принята интенсивность движения грузового транспорта свыше 5 т, который преобладает в транспортной инфраструктуре на всей территории страны и оказывает значительное влияние на срок службы дороги. Структура транспортного потока по грузоподъемности представлена в табл. 1.

**Таблица 1 – Структура транспортного потока по грузоподъемности**

Транспортные средства	Грузоподъемность, т	В процентах, %
Легкие	до 2,0	19
Средние	от 2,1 до 5,0	31
Тяжелые	от 5,1 до 8,0	21
Очень тяжелые	свыше 8,0	29

Из представленных данных в табл. 1 видно, что доля транспортных средств с повышенной осевой нагрузкой составляет половину всех транспортных средств. Категория автомобильной дороги опре-



деляется по среднесуточной интенсивности движения грузового транспорта и представлена в табл. 2.

**Таблица 2 - Классификация и категория автомобильных дорог в ДРК**

Класс автомобильной дороги	Категория	Среднесуточная интенсивность движения грузовых автомобилей, авт/сут
Автомобильные дороги (А)	T0	750
	T1	300 - 750
Национальные дороги (N)	T2	150 - 300
	T3	50 - 150
Департаментальные (D)	T4	25 - 50
	T5	25

В качестве показателя при определении геометрических параметров автомобильной дороги принята расчетная скорость движения транспортных средств с учетом рельефа местности, которая представлена в табл. 3.

**Таблица 3 - Расчетные скорости движения транспортных средств в ДРК**

Категория дороги	Расчетная скорость движения, км/час		
	Равнинная местность	Холмистая местность	Горная местность
T0	110	90	80
T1	100	80	70
T2	100	70	60
T3	90	70	60
T4	90	60	40
T5	90	35	30

Анализ расчетных скоростей движения транспортных средств показал, что по сравнению с РФ в ДРК они ниже на 20-10 км/час. Это объясняется принятым критерием при выборе условного автомобиля при расчете скоростных режимов. Анализ нормативных документов ДРК показал, что имеются различия в геометрических параметрах дорожной конструкции как при устройстве земляного полотна, так и дорожной одежды (табл. 4).

**Таблица 4 - Параметры автомобильных дорог в ДРК**

Категория дороги	Ширина земляного полотна, м	Ширина полосы проезжей части, м	Ширина обочины, м	Ширина полосы укрепления обочин, м	Ширина остановочной полосы вместе с укрепленной полосой, м
T0	35/30	4,0	5,5	1,0/0,75	3,50/3,25
T1	30	4,0	4,5	0,75	3,25
T2	15	4,00/3,75	3,8	0,5	3,0
T3	15	3,75	2,5	0,5	-
T4	10	3,00/3,10	1,8	0,5	-
T5	5	4,5	1,8	-	-

Выбор типа покрытия зависит от категории дороги. Для автомагистралей и национальных дорог применяют асфальтобетонные и монолитные цементобетонные покрытия, а при устройстве дорог

усовершенствованного и переходного типов используют щебеночные и гравийные материалы из природных каменных материалов и отходов промышленности, обработанные вязкими и жидкими органическими вяжущими и битумными эмульсиями. Выбор материала для устройства дорожных одежд и технологию ее устройства применяют с учетом требований принятых нормативных документов (спецификаций). Для приготовления асфальтобетонных смесей применяют материалы, соответствующие требованиям спецификаций ДРК (табл. 5).

**Таблица 5 - Нормативные документы на материалы для устройства дорожных одежд**

Спецификация	Область применения
62/N/11	COUCHEDEBASE.ENMAKADAMALLEAU (Требования к устройству щебеночных слоев основания)
62/N/12	COUCHEDEBASE.ENBITUMACADAM (Расход материалов на устройство оснований и покрытий автомобильных дорог).
62/N/13	COUCHEDEBASE.ENSOL-CIVENT (Устройство слоев с применением грунтоцемента)
62/P/14	COUCHEDEROULMENT. ENENROBESD'ENSES. PREPARESEPOSESACHAUD (Приготовление горячих асфальто-бетонных смесей и техника для укладки)
62/N/15	COUCHE DE BASE ET DE SURFACE. ENSABLES.ENROBES ACHAUD AU BITUM. ENPOSTED'ENROBAGEFIXE (Приготовление горячих асфальто-бетонных смесей и техника для укладки, Инструкция по устройству покрытий и оснований из щебеночных, гравийных и песчаных материалов)
62/N/16	COUCHE DE BASE EN SABLES. ENROBES A FROID AU BITUME. EN POSTE D'ENROBASE. FIXE OU MOBILE. (Применение битумо-минеральной смеси)
62/N/18	COUCHEDEBASEENSOLGRAVELEUX. LATERITIQUE. OUAUTRESSOLSGRENUS, AMELIORESPARTRAITEMENT. AU LIANT HYDRAULIQUE (Устройство слоя укрепления)
62/O/11	IMPREGNATION AU BITUME. DES COUCHES DE BASE. DUTUPEGRANULARE (Битумная пропитка гранулированных оснований)
62/O/12	ENDUITD'ACCROCHAGE (Распределение вяжущего по основанию при укладке слоев покрытия).

Анализ нормативной базы для устройства дорожных одежд показал, что принятые нормативы в ДРК охватывают все технологии, связанные с устройством дорожных одежд. По аналогии с нормативной базой на строительство дорожных одежд в РФ, принятые нормативы предусматривают устройство щебеночных слоев как методом заклинки, так и методами пропитки уложенного щебеночного слоя битумными материалами (62/ /11,62/ /12). Для повышения несущей способности слоев основания дорожной одежды применяется технология устройства слоев с использованием минеральных материалов, что обеспечивает более высокую прочность слоя (62/ /13). Допускается применение щебня смежных фракций.

При устройстве асфальтобетонных покрытий применяется спецификация 62/ N/ 15, предусматри-



вающая в качестве вяжущего материала использование дорожных нефтяных битумов и природных битумов аналогичных марок. Особенностью применяемых битумных материалов является более узкий диапазон по вязкости, что позволяет в большей степени стабилизировать их свойства. Различие между рекомендованными марками битумов заключается в температурных режимах приготовления горячих асфальтобетонных смесей, что влияет на затраты на приготовление смесей. Сравнительный анализ температурных режимов битумов при приготовлении смесей по отношению к применяемым битумам в РФ, представлен в табл. 6.

Таблица 6 - Сравнительная характеристика вяжущего

Марка битума	ДРК		РФ	
	Требования к температурным режимам битумов для приготовления асфальтобетонных смесей			
	Спецификация 62/Н/15		ГОСТ 9128-2013	
	Температура битума при приготовлении, °С		Марка битума	Температура, при приготовлении, °С
Битум нефтяной дорожный	Природный битум			
50-60	136 до 163	150 до 190	БНД 40/60	150 до 160
60-70	136 до 163	150 до 190	БНД 61/90	145 до 155
70-85	136 до 163	150 до 190	БНД 91/130	140 до 150
85-100	136 до 163	150 до 190	БНД 131/200	130 до 140
100-120	136 до 163	150 до 190	-	-

Из представленных данных в табл. 6 видно, что температурные режимы дорожных нефтяных битумов в ДРК для приготовления асфальтобетонных смесей не зависят от марки битума и находятся в пределах интервалов температуры в РФ. Использование природного битума для горячих смесей существенно отличаются от режимов РФ. Существуют различия в составах горячих асфальтобетонных смесей, как по содержанию минеральных материалов, так и содержанию битума. Требуемые показатели асфальтобетона в ДРК и РФ представлены в табл. 7.

Таблица 7 - Требования к показателям физико-механических свойств асфальтобетонов

Показатель	ДРК	РФ
Содержание щебня, %	Не менее 45%	30-60%
Содержание песок, %	Не менее 20%	свыше 10 %
Дорожный битум	Не менее 6-8,5 %	3,5-7,0
Стабилизирующая добавка	Не нормируется	5-10%
Остаточная пористость, %	1,5 до 4,5	1,0% до 10,0%
Водонасыщение, % по объему	Не более 10	от 5% до 9%
Набухание, %	Не более 2,0	0,5-2%
Предел прочности при растяжении при изгибе, МПа не менее	Не менее 1,7	Не менее 4
Водостойкость %	Не менее 0,6	Не менее 0,95
Предельная относительная деформация на растяжение, не менее	0,003	Не менее 0,005

В качестве минерального материала для приготовления горячих асфальтобетонных смесей используется щебень, который различается по фракционному составу (5-10, 10-20 и 20-40 мм). В отличие от РФ для устройства слоев покрытия используется крупнозернистый асфальтобетон с размерами фракции щебня 25,4 и 19,1 мм. Допускается повышенное содержание мелких частиц в асфальтобетонной смеси в ДРК (12-15%) в отличие от требований к смесям в РФ (4-10%). Следует заметить, что повышенное содержание мелких частиц минерального материала при увеличении вяжущего в смеси приводит к снижению прочностных характеристик асфальтобетона, что с учетом высоких температур окружающего воздуха способствует снижению эксплуатационных характеристик покрытия.

Анализ нормативных документов показал, что имеются различия в технологии устройства асфальтобетонных покрытий. Скорость укладки горячей асфальтобетонной смеси в ДРК регламентирована в пределах 3-6 м/мин, хотя в РФ скорость укладки смеси нормативными документами не регламентирована и зависит от заданного темпа устройства покрытия. Нормативными документами РФ скорость перемещения катка при уплотнении слоя асфальтобетонной смеси принимается 1,5-2,0 км/час, при укатке слоя в ДРК скорость перемещения не должна превышать 5 км/ч. В ДРК не определяются катки по типам, т.е. по массе катка. Величиной, характеризующей степень уплотнения слоя смеси, является плотность слоя материала, которая характеризуется коэффициентом уплотнения. Если в РФ требуемый коэффициент уплотнения слоя асфальтобетона принимается 0,98-0,99, то в ДРК он не конкретизирован и должен составлять не менее 0,95. Достижение такого коэффициента уплотнения характеризует недостаточность процесса уплотнения и низкие характеристики уплотняемого слоя.

Нормативным документом 62/Н/16 определены требования к технологии устройства дорожных одежд с применением битумо-минеральных материалов, состоящих из минерального заполнителя и жидкого битума (RC2, RC3 или MC3) или битумной эмульсии (SS1, MS2 и MS3), перемешанных в стационарных условиях в смесителях или непосредственно на месте производства работ. Требования к битумной эмульсии представлены в табл. 8.

Таблица 8 - Нормативные требования к битумной эмульсии

Наименование показателя	Значение для эмульсии класса (РФ)ГОСТ Р 52128-2003			ДРК 62/Н/16		
	ЭБК-1	ЭБК-2	ЭБК-3	SS-1	MS-2	MS-3
Содержание вяжущего с эмульгатором, % по массе	От 50 до 70	От 50 до 60	От 55 до 60	55	60	65
Условная вязкость при 20 °С, с	От 10 до 65	От 10 до 25	От 15 до 25	20-100	100	-



Из представленных в табл. 8 показателей битумных эмульсий видно, что содержание вяжущего в составе эмульсии в ДРК определено конкретным процентным содержанием, в то же время нормативами РФ содержание вяжущего находится в установленных интервалах. Наблюдается существенное различие в условной вязкости применяемых эмульсий в РФ и ДРК. Температура воздуха при производстве работ должна быть выше +10°C. Толщина слоя при укладке смеси с использованием битумной эмульсии принимается в пределах от 0,075 до 0,15 м. На начальной стадии уплотнения рекомендуется применять катки на пневматических шинах массой 30-70 кН и на завершающем этапе уплотнения использовать катки с жесткими металлическими вальцами массой 50 кН. Минимальное значение коэффициента уплотнения принимается 0,9, что явно недостаточно для обеспечения требуемой прочности слоя покрытия.

При строительстве национальных дорог категории Т2 и департаментальных - категорий Т4 и Т5, характеризующихся сравнительно низкой интенсивностью движения, применяют технологии при устройстве покрытий дорог с укреплением из местных грунтов с использованием извести и цемента (спецификации 62/Н/18, 62/О/11 и 62/О/12). В качестве материала используют гравий, илистый или суглинистый песок. Толщина базового слоя установлена спецификациями от 0,10 до 0,15 м. Сравнительный анализ нормативной документации на строительство автомобильных дорог ДРК и РФ показал, что принятые нормативные документы регламентирует конструктивные параметры дорог, применяемые материалы и технологию строительства дорожных одежд.



Рис. 1. Дефекты дорожных покрытий

В процессе эксплуатации автомобильных дорог за счет влияния осевой нагрузки и погодных факторов (высокой температуры воздуха и выпадения обильных осадков) происходит образование дефектов как земляного полотна, так и дорожных покрытий (рис. 1).

Анализ дефектов, представленных на рис. 1 позволяет сделать вывод, что причиной такого состояния дороги является недостаточная прочность земляного полотна и дорожных одежд, что связано влагонасыщением и недостаточной прочностью дорожной конструкции.

Строительство и ремонт автомобильных дорог требует применения значительных материальных ресурсов и больших инвестиций. Сложности с решением поставленной задачи связаны с ограниченностью финансирования дорожной отрасли, высокой стоимостью материалов и слабо развитой производственной базой по производству дорожных материалов. Средняя стоимость материалов для строительства автомобильной дороги в ДРК представлена в табл. 9.

Таблица 9 - Средняя стоимость материалов для строительства автомобильной дороги в ДРК

Наименование материала	Грунт	Песок	Щебень	Цемент	Битум	Асфальтобетон
Отпускная цена 1,0 т, в долларах	8,9	14,5	32,8	185	1360	580

Анализ цен на материалы для строительства автомобильных дорог в ДРК показал, что значительные финансовые затраты при строительстве автомобильных дорог связаны с использованием вяжущих материалов, стоимость которых превышает стоимость других составляющих смесей на порядок.

Анализ и обзор современных технологий строительства и ремонта автомобильных дорог показал, что в мировой практике широкое применение получили материалы, получаемые в виде отходов других производств. Активно используются отходы при холодном фрезеровании старых асфальтобетонных покрытий, получаемых при капитальном ремонте и реконструкции автомобильных дорог как в РФ, так и за рубежом. Результаты расчетов показали, что при холодном фрезеровании асфальтобетонного покрытия шириной 7,0 м и толщине слоя 0,05 м с одного километра дороги получают отходы в виде асфальтогранулята порядка 500-650 т.

В ДРК данная технология применяется недостаточно активно и требует проведения исследований в области технологии применения отходов при холодном фрезеровании асфальтобетонных покрытий в условиях республики. В тоже время имеются предпосылки для широкого применения такой технологии при проведении ремонтов и реконструкции



автомобильных дорог. Получаемый материал при холодном фрезеровании старых асфальтобетонных покрытий можно применять не только для укрепления обочин автомобильных дорог, но и используя регенерацию получаемого материала, обеспечить потребность в материале для строительства и ремонта дорожных одежд.

С учетом вышесказанного необходимо исследовать физико-механические свойства материала, получаемого при холодном фрезеровании асфальтобетонных покрытий в ДРК и рассмотреть возможности дальнейшего использования в дорожном строительстве в условиях Республики.

Сравнительный анализ результатов исследования свойств асфальтогранулобетонных смесей, получаемых из отходов холодного фрезерования асфальтобетонных покрытий в ДРК и РФ позволит обосновать технологию строительства дорог с использованием холодного фрезерования покрытий нежесткого типа в ДРК.

**Методика проведения исследования.** Исследования характеристик асфальтогранулобетона проводились в лабораториях дорожных организаций ДРК и РФ (г. Тамбов). При исследовании характеристик битумоминеральной смеси в условиях ДРК применялся переработанный асфальтогранулят фракций размером 0-40 мм, полученный после дробления и сортировки на дробильно-сортировочной установке.

Приготовление смесей осуществлялось в следующей последовательности. В нагретый асфальтогранулят до температуры 100°C добавляли портландцемент в количестве от 0 до 4%, битумную эмульсию от 3 до 5% и щебень гранитный фракций 5-20 и 3-10 мм целью обеспечения оптимального гранулометрического состава с последующим перемешиваем приготовленной смеси. Для проведения испытаний готовили образцы асфальтобетона цилиндрической формы размером 150 мм путем уплотнения на прессе при давлении до 40 МПа.

При проведении исследования в РФ за исходный материал принят переработанный асфальтогранулят фракций размером 8/16 и 18/36 мм при содержании остаточного битума 2%. В качестве вяжущего материала применялась битумная эмульсия ЭБК-2 с добавлением портландцемента марки М-400. В процессе приготовления смеси асфальтогранулят нагревали до температуры 90-100°C. По окончании нагрева добавлялся цемент и битумную эмульсию с последующим перемешиванием. Для определения предела прочности слоя асфальтогранулобетона изготавливались керны из смеси с разным содержанием битумной эмульсии и цемента в соответствии с ГОСТ 12801. Формование образцов из асфальтогранулобетонной смеси производилось с использованием гидравлического пресса ТП-1-1500.

*Исследовательская часть*

В РФ установлены требования к характеристикам материала для устройства конструктивных слоев дорожной одежды с применением технологии холодного ресайклинга в зависимости от вида вяжущего при регенерации асфальтогранулобетонных смесей, которые представлены в табл. 10 [2-5].

**Таблица 10 - Требования к материалам для дорожных одежд с использованием холодного ресайклинга**

Наименование показателя	Нормы в зависимости от категории автомобильной дороги										
	I-II		III				IV				
	для смесей типа										
	Э	М,К	В	Э	М,К	В	Б	Э	М,К	В	Б
Предел прочности при сжатии, не менее, МПа, при температуре 20°C в возрасте:											
а) 1 суток	-	-	1,4	-	-	1,4	1,2	-	-	1,4	1,2
б) 7 суток	1,4	2,0	-	1,4	2,0	-	-	1,4	2,0	-	-
То же, при температуре 50°C в возрасте											
а) 1 суток	-	-	0,7	-	-	0,6	0,5	-	-	0,6	0,5
б) 7 суток	0,7	0,8	-	0,6	0,7	-	-	0,5	0,7	-	-
Коэффициент водостойкости, не менее	0,7		0,6				0,6				
Водонасыщенность по объему, %, не более	10		12				14				

В качестве добавок при регенерации асфальтогранулята используют битумные эмульсии (Э), вспененный битум (В), разогретый битум (Б), минеральное вяжущее (цемент или известь) (М) и комплексное вяжущее (битумная эмульсия и цемент) (К). Применение разных добавок влияет как на расчетные характеристики, так и на скорость структурообразования. Наибольший эффект при регенерации асфальтогранулята достигается при использовании битумной эмульсии и комбинированного вяжущего.

С целью уточнения влияния разных добавок на прочность асфальтогранулобетона были изготовлены образцы с применением разных добавок при регенерации асфальтогранулята, получаемого в условиях ДРК. По результатам испытаний установлено, что наибольшей прочности образцы имеют при применении комбинированных добавок (битумной эмульсии 3,8% и цемента 4%). Для уточнения влияния содержания асфальтогранулята в составе смеси были сформированы образцы при разном содержании битумной эмульсии и портландцемента, которые представлены в табл. 11.

**Таблица 11- Состав асфальтогранулобетонной смеси**

Состав асфальтогранулобетонной смеси	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
Асфальтогранулят, %	84,6	70,3	56,9	69,2	76,0	51,9
Фракция 5-20 мм	15,4	22,0	34,3	22,1	24,0	48,1
Фракция 3-10 мм	-	7,7	8,8	8,7	-	-
Портланд цемент	3,8	2,9	3,1	-	-	-
Битумная эмульсия	3,8	3,3	3,8	3,8	3,9	3,8



Результаты испытания кернов представлены в табл. 12.

**Таблица 12 - Результаты испытания кернов на предел прочности при сжатии**

Наименование показателя	Варианты					
	1	2	3	4	5	6
Предел прочности при сжатии, не менее, МПа, при температуре 20°C в возрасте:						
1сут	3,8	3,1	2,5	1,8	0,5	-
7 сут	4,3	4,2	3,8	2,2	1,1	1,7
Предел прочности при сжатии, не менее, МПа, при температуре 50°C в возрасте:						
1сут	1,7	2,2	0,9	-	-	-
7 сут	2,0	2,7	1,7	0,9	0,4	0,7
Коэффициент водостойкости, не менее	0,7	0,8	0,7	0,6	0,6	0,6
Водонасыщение по объему, %, не более	16	18	14	10	10	10

Из представленных выше результатов испытаний видно, что предел прочности асфальтогранулобетона зависит от содержания переработанного асфальтогранулята в смеси и с его увеличением прочность возрастает. Доля асфальтогранулята в асфальтогранулобетонной смеси должна быть выше 80% от общей массы смеси. С увеличением содержания цемента жесткость смеси возрастает, что требует применения повышенной нагрузки на уплотняемый слой. С повышением содержания битумной эмульсии в смеси ее прочностные характеристики снижаются. В качестве оптимальной добавки при регенерации переработанного асфальтогранулята следует принимать 4% битумной эмульсии и 3,8-4,0% цемента.

Проведенные испытания образцов асфальтогранулобетона при разном содержании фракций асфальтогранулята (5-10, 10-20 и 20-40 мм) при содержании битумной эмульсии ЭБК-2 от 2 до 6 % показали, что предел прочности образцов находится в пределах 2,4-3,1 МПа при трещиностойкости 4,0-4,2 МПа и пористости 15,5-16,2%, что отвечает требованиям нормативных документов.

На основании полученных результатов испытаний образцов асфальтогранулобетона, полученных в РФ и ДРК, можно сделать вывод, что их характеристики отвечают требованиям нормативных документов как РФ, так и ДРК.

## Выводы

Анализ результатов исследований свойств асфальтогранулобетонных смесей, получаемых при регенерации отходов битумной эмульсией и комбинированных вяжущих, соответствует предъявляемым требованиям нормативных документов как в РФ, так и в ДРК. Разработанная технология регенерации переработанного асфальтогранулята для устройства дорожных одежд автомобильных дорог в РФ может быть также применена в ДРК.

## Библиографический список

1. Макая, Л. М. Современные проблемы дорожного строительства в Демократической Республике Конго / Л. М. Макая, А. Ф. Зубков // Современные проблемы материаловедения : Сборник научных трудов II Всероссийской (национальной) научно-практической конференции, посвященной 65-летию ЛГТУ, Липецк, 18 февраля 2021 года. – Липецк: Липецкий государственный технический университет, 2021. – С. 307-310. – EDN IWPRFH.
2. Эффективность применения асфальтогранулята при ремонте и реконструкции автомобильных дорог / Л. С. Зарапина, Л. М. Макая, С. А. Сенибабнов [и др.] // Устойчивое развитие региона: архитектура, строительство и транспорт : Материалы IX-ой Международной научно-практической конференции, посвященной памяти академика РААСН Чернышова Е.М., Тамбов, 21–22 сентября 2022 года. – Тамбов: Издательство ИП Чеснокова А.В., 2022. – С. 346-349. – EDN KLVXXU.
3. Макая, Л. М. Разработка математической модели процессов уплотнения слоя дорожной одежды / Л. М. Макая, А. Ф. Зубков, К. А. Андрианов // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений : Тезисы докладов VIII-го международного симпозиума, Тамбов, 17–21 мая 2023 года. – Тамбов: ИП Чеснокова А.В., 2023. – С. 316-318. – EDN NDTMWO.
4. Влияние битумной эмульсии на свойства асфальтогранулобетонной смеси при устройстве покрытий нежесткого типа автомобильных дорог / Л. М. Макая, Л. С. Зарапина, К. А. Андрианов, А. Ф. Зубков // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2023. – Т. 25, № 6. – С. 233-250. – DOI 10.31675/1607-1859-2023-25-6-233-250. – EDN VWBDUN.
5. Makaya, L. M. Influence of the composition of asphalt granular concrete mixture on the deformation of the coating layer during the construction of the road pavement / L. M. Makaya, K. A. Andrianov, A. F. Zubkov // Russian Journal of Building Construction and Architecture. – 2024. – No. 1(61). – P. 86-100. – DOI 10.36622/VSTU.2024.61.1.008. – EDN HZFGJZ.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 12.09.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 12.09.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 624.1

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения; 2.1.5. Строительные материалы и изделия; 2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_70

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОВЕРКИ ПРОЧНОСТИ В ПОПЕРЕЧНОМ НАПРАВЛЕНИИ ДЛЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННОЙ ПЛИТЫ-ОБОЛОЧКИ ПЕРЕКРЫТИЯ

© Авторы 2024  
SPIN: 8064-4511

**МИРСАЯПОВ Илшат Талгатович**

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Железобетонные и каменные конструкции»

*Казанский государственный архитектурно-строительный университет  
(Россия, Казань, e-mail: mirsayapovit@mail.ru)*

Author ID: 599509

**СЕЛИВАНОВ Антон Валерьевич**

старший преподаватель, кафедра «Мосты и тоннели»

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет  
(Россия, Омск, e-mail: ant.seliwanov@yandex.ru)*

Author ID: 419933

**РЕГЕР Федор Федорович**

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры «Промышленное и гражданское строительство»

*Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет  
(Россия, Омск, e-mail: fedorreger@gmail.com)*

**Аннотация.** Работа посвящена разработке инженерной методики проверки прочности в поперечном направлении для железобетонной плиты-оболочки перекрытия.

**Ключевые слова:** проверка прочности; разработка инженерной методики; железобетонная плита-оболочка перекрытия

**Для цитирования:** Мирсаяпов И.Т., Селиванов А.В., Регер Ф.Ф. Разработка методики проверки прочности в поперечном направлении для железобетонной плиты-оболочки перекрытия // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 70-74. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_70.

Original article

### DEVELOPMENT OF A TESTING METHOD OF THE STRENGTH IN TRANSVERSE DIRECTION OF REINFORCED CONCRETE SHELL SLAB

© The Author(s) 2024

**MIRSAYAPOV Ilshat Talgatovich**

Dr. of Technical, Associate Prof., Head of the Department

*Kazan State University of Architecture and Civil Engineering*

*(Russia, Kazan, e-mail: mirsayapovit@mail.ru)*

**SELIVANOV Anton Valerievich**

Senior Lecturer, Department of Bridges and Tunnels

*Siberian State Automobile and Road University*

*(Russia, Omsk, e-mail: ant.seliwanov@yandex.ru)*

**REGER Fedor Fedorovich**

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department

of Industrial and Civil Engineering

*Siberian State Automobile and Road University*

*(Russia, Omsk, e-mail: fedorreger@gmail.com)*

**Abstract.** The work is devoted to the development of an engineering method for testing the strength in the transverse direction for a reinforced concrete shell slab.



**Keywords:** strength testing; development of an engineering method; reinforced concrete shell slab

**For citation:** Mirsayapov I.T., Selivanov A.V., Reger F.F. Development of a testing method of the strength in transverse direction of reinforced concrete shell slab // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 70-74. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_70.

**Введение.** Сборные железобетонные ребристые плиты длительное время использовались в перекрытиях и покрытиях различных зданий. В девяностые годы XX века в связи с сокращением объемов промышленного строительства эти конструкции на многих заводах были сняты с производства.

В настоящее время в связи с возрождением и модернизацией промышленных предприятий в Российской Федерации потребность в ребристых плитах возникла вновь. При возобновлении их производства возникает ряд вопросов, связанных, прежде всего с технологией изготовления.

Результаты теоретических [1-2] и экспериментальных [3-4] исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) пустотных плит перекрытий подтвердили возможность отказа от использования в них арматурных каркасов и сеток и изготовления их по безопалубочной технологии [5-7], позволяющей уменьшить численность обслуживающего персонала в 2-2,5 раза, энергоемкость на 50-70%, повысить производительность производства по сравнению с агрегатно-поточной технологией [8-10], требующей больших затрат ручного труда, энергоресурсов и использования силовых форм. В то же время безопалубочная технология имеет ряд ограничений (невозможность установки поперечной арматуры, а также устройства поперечных и торцовых ребер), не позволяющих изготавливать ребристые плиты [11-13].

Заменой ребристой плите, может являться плита-оболочка [14-16] или вспарушенная плита [17-19] с цилиндрической в поперечном направлении нижней поверхностью и плоской верхней, находящаяся при равномерной нагрузке в напряженном состоянии, близком к безмоментному, оптимальная по несущей способности и по расходу материалов, что позволяет армировать ее только продольной рабочей арматурой и изготавливать методом безопалубочного формования.

На основании анализа опыта конструирования и строительства пологих оболочек перекрытий и покрытий малых размеров нами была предложена железобетонная плита-оболочка [20-23] (рисунок 1).

Результаты компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния разработанной конструкции, выполненного в [22], при различных условиях её опирания и величинах предварительного напряжения арматуры, подтвердили предположения о сдерживании поперечных деформаций ребер по всей длине плиты-оболочки при максимальном предварительном напряжении и ограничении поперечных деформаций на опорах.

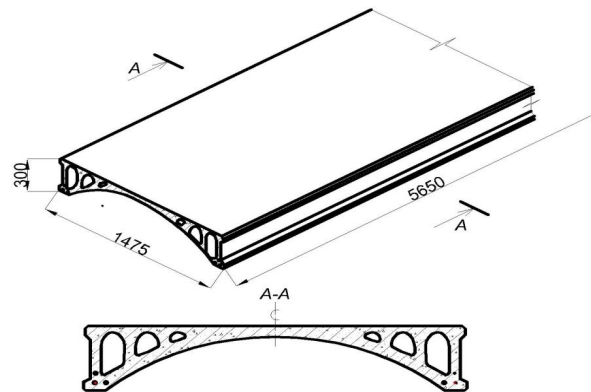


Рисунок 1 – Конструктивное решение плиты-оболочки изготовление которой возможно по технологии безопалубочного формования, включающая верхнюю горизонтальную полку и нижнюю изогнутую, продольные боковые и промежуточные ребра и продольные пустоты, размещенные между ребрами

Экспериментальное исследование показало [23], что ее разрушение начинается с разрушения продольных контурных ребер вследствие нарушения анкеровки арматуры с последующим ее продрогиванием. Далее, происходит разрушение бетона в полке, начинающееся с образования сквозных диагональных трещин, заканчивающееся образованием сквозной продольной трещины в середине полки по ширине.

Обзор методик расчетов аналогичных конструкций показывает, что в п. 9.7 СП 387.1325800.2018 [24] говорится, что расчет большепролетной длинной цилиндрической оболочки по прочности, жесткости и трещиностойкости следует производить с учетом образования трещин в бортовых элементах и в плите, и трещин вдоль образующих в плите или трещин в поперечных ребрах. Допускается не учитывать при расчете косые трещины в углах (рисунок 2).

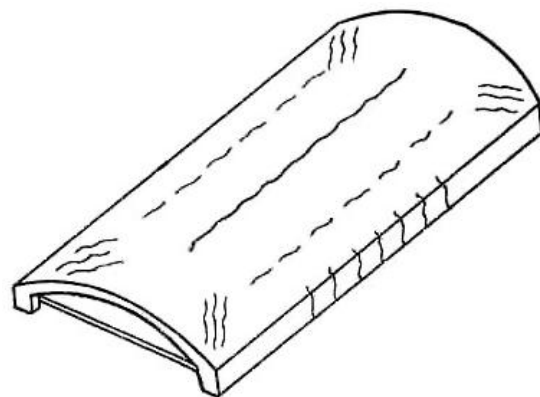


Рисунок 2 – Схема трещин в длинной цилиндрической оболочке



В соответствии с указаниями п. 9.10 СП 387.1325800.2018 [24] для расчета в поперечном направлении рассматривают полосу единичной ширины, вырезанную в любом сечении по длине оболочки, которую рассчитывают как круговую бесшарнирную арку пролетом, равным ширине оболочки.

В п. 15.10 СП 387.1325800.2018 [24] говорится, что вспарушенные плиты, опертые по двум сторонам или по углам, следует рассчитывать по балочной и шатровой схемам излома (рисунок 3).

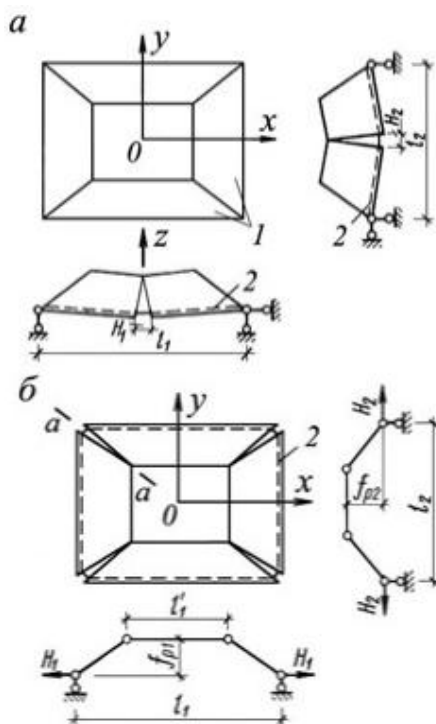


Рисунок 3 – Схемы разрушения вспарушенных панелей и шатровых складок  
а – с изломом посередине пролета (балочная схема);  
б – с разделением на 5 дисков (шатровая схема излома);  
1 – боковые грани; 2 – основная арматура пояса;  
Н<sub>1</sub> и Н<sub>2</sub> – усилия в поясе

В [25] при исследованиях квадратных в плане железобетонных плит-оболочек с различной кривизной нижней поверхности, свободно опертых по контуру, находящихся под действием равномерно распределенной нагрузки, было установлено, что эпюра изгибающих моментов, действующих вдоль оси симметрии конструкции, характеризуется двумя экстремальными точками, одна из которых соответствует максимальным значениям отрицательных изгибающих моментов, концентрирующихся в угловых зонах, а другая – положительных, имеющих место в центре панели.

В [26] на основании результатов испытаний откорректирована расчетная модель пустотной панели покрытия с полкой, имеющей криволинейную нижнюю и плоскую верхнюю грани. Предлагается

рассчитывать ее как пространственную систему, состоящую из свода-оболочки переменной толщины с окаймлением бортовыми элементами приведенного коробчатого сечения и диафрагмами – торцевыми ребрами.

**Методология.** На основании приведенных выше результатов целью данной работы является разработка методики проверки прочности исследуемой конструкции в поперечном направлении в центре нижней грани полки.

При ее достижении рассчитывалась круговая бесшарнирная арка, с пролетом, равным ширине плиты-оболочки (рисунок 4).

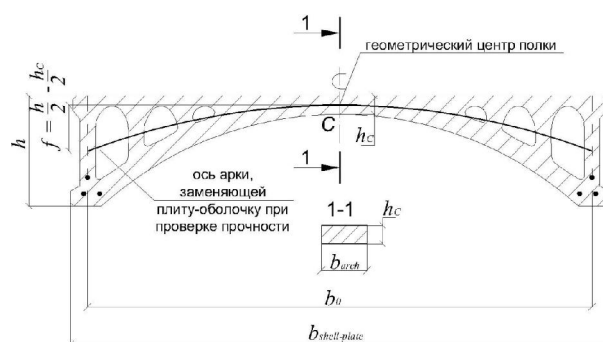


Рисунок 4 – Поперечное сечение плиты-оболочки и арка, заменяющая ее, рассчитываемая при проверке прочности в поперечном направлении

Рассчитываемая арка имела условную затяжку (рисунок 5).

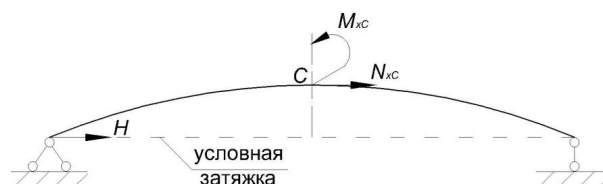


Рисунок 5 – Расчетная схема арки, заменяющей плиту-оболочку при проверке прочности в поперечном направлении и усилия, возникающие в ней роль которой играют продольные контурные ребра, ограниченные на опорах конструктивно, а в середине пролета – за счет жесткости ребер, т.е. за счет их конструкции и предварительного напряжения

При решении данной задачи проверяется выполнение условия

$$\sigma_{xc}^{theor.} = \frac{N_{xc}}{A_c} + \frac{M_{xc}}{W_c} \leq R_{bt} \gamma_{bt}, \quad (1)$$

где  $N_{xc}$  и  $M_{xc}$  – это нормальное усилие и изгибающий момент, возникающие в середине пролета рассчитываемой арки (см. рисунок 5), определяемые по формулам, используемым при расчете арки с затяжкой,

$$N_{xc} = \frac{q_i b_{arch} l_0^2}{8f} k_c \gamma_{cr} \quad (2)$$

$$M_{xc} = \frac{q_i b_{arch} l_0^2}{8} (1 - k_c \gamma_{cr}) \quad (3)$$

в которых  $\nu_{1c}$  и  $k_c$  – это коэффициенты, учитывающие наличие условной затяжки в арке, рассчитываемой при проверке прочности, и влияние продольной силы, возникающей при арочной работе плиты-обо-



лочки в поперечном направлении, рассчитываемые по формулам

$$v_{1C} = \frac{15}{8} \cdot \frac{I_C}{f^2} \left( \frac{E_b}{E_1 \cdot A_{1C}} + \frac{n}{A_C} \right) \quad (4)$$

$$k_C = \frac{1}{1+v_{1C}} \quad (5)$$

$\gamma_{bt} = 1,9$  – коэффициент увеличения прочности растянутого бетона в центре полки за счет остальных участков, где  $\sigma_x^{theor.} < R_{bt}$ .

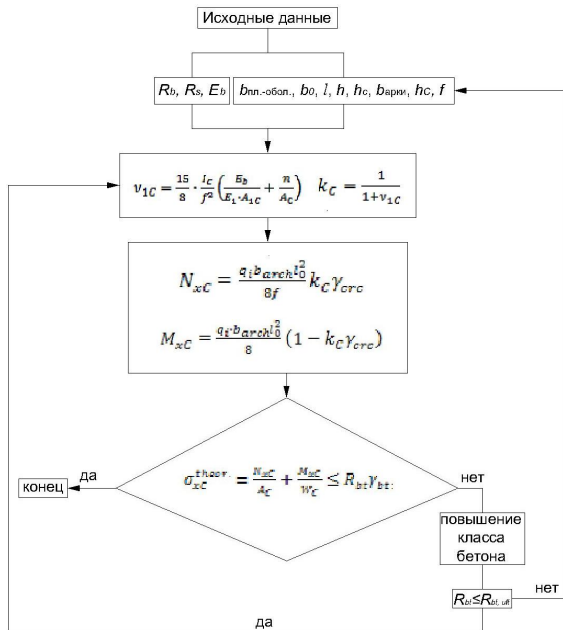


Рисунок 6 – Блок-схема методики проверки прочности плиты-оболочки в поперечном направлении

На рисунке 6 представлена блок-схема методики проверки прочности плиты-оболочки в поперечном направлении.

**Результаты.** В таблице 1 приведено сравнение результатов проверки прочности и компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции с результатами ее экспериментального исследования.

Таблица 1. Сравнение результатов проверки прочности и компьютерного моделирования напряженно-деформированного состояния исследуемой конструкции с результатами ее экспериментального исследования

Методика исследования	Напряжения $\sigma_{xc}$ , МПа	Разница, %
Эксперимент	+0,686	---
Теоретическое	+0,796	+13,8
Расчет в ПК ЛИРА	+0,78	+12
Расчет в ПК Ansys	+0,813	+15,6

**Обсуждение.** Сопоставление результатов, полученных различными способами для исследуемой плиты-оболочки с пустотами в полке, показывает хорошую их сходимость.

#### Выводы

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод о том, что разработанная методика

расчета плиты оригинального конструктивного решения, основанная на методике расчете арки с затяжкой, позволяет производить проверку ее прочности в поперечном направлении в центре полки.

#### Библиографический список

1. Шустов, С. А. Общие сведения о шпоночном соединении пустотных плит перекрытия / С. А. Шустов // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 3. – С. 592-597. – EDN CDISAK.
2. Шустов, С. А. Оценка НДС шпоночного соединения пустотных плит перекрытия / С. А. Шустов // Вопросы устойчивого развития общества. – 2022. – № 7. – С. 823-839. – EDN WMPEIY.
3. Белов, А. В. Экспериментальное исследование платформенного стыка двухстороннего опирания пустотных плит перекрытия с учетом возможных отклонений при возведении / А. В. Белов, Н. Л. Тишков, П. П. Осипов // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. – 2023. – № 1(43). – С. 20-25. – DOI 10.52684/2312-3702-2022-42-4-20-25. – EDN CCMHJP.
4. Зайцев А.М., Ларионов С.Г., Панфилов Д.В. Несущая способность типовой пустотной плиты перекрытия при объемном взрыве внутри помещения // Научный журнал строительства и архитектуры. 2023. № 2 (70). С. 11-22.
5. Белгородское решение - железобетонные плиты перекрытий из керамзитобетона, изготавливаемые по стендовой безопалубочной технологии (Информация) // Строительные материалы. – 2022. – № 3. – С. 9-11. – EDN UGTEVA.
6. Шаховал, Н. С. Решение вопросов организации и планирования производства пустотных плит по технологии безопалубочного формования / Н. С. Шаховал, Т. С. Лавневич // Техника и технологии строительства. – 2022. – № 4(32). – С. 55-61. – EDN LQPBWU.
7. Умаров, К. С. Выбор технологии и оборудования для непрерывного безопалубочного формования на длинном стенде в условиях Центрально-Азиатского региона / К. С. Умаров, Л. А. Усманходжаева, О. Адхамов // Universum: технические науки. – 2022. – № 12-3(105). – С. 14-20. – DOI 10.32743/UniTech.2022.105.12.14741. – EDN SCNQBK.
8. Хошафян, С. О. Проблемы современного производства бетонных и железобетонных конструкций заводского изготовления / С. О. Хошафян // Энигма. – 2020. – № 26. – С. 143-146. – EDN JVESBX.
9. Саргсян, О. Т. Проблемы современного производства железобетонных конструкций / О. Т. Саргсян // Студенческий вестник. – 2021. – № 47-7(192). – С. 89-90. – EDN FPOXKZ.
10. Блажко, В. П. Технические решения сборно-монолитного здания для заводов ЖБИ с ограниченными технологическими возможностями / В. П. Блажко, Л. Н. Смирнова // Бетон и железобетон. – 2023. – № 4(618). – С. 28-35. – DOI 10.37538/0005-9889-2023-4(618)-28-35. – EDN TBYBVO.
11. Выставка, Е. В. Ребристое монолитное железобетонное перекрытие с балочными плитами и его применение / Е. В. Выставка // Colloquium-Journal. – 2019. – № 10-1(34). – С. 66-67. – EDN LHTYQX.
12. Хапин, А. В. К расчету сборных железобетонных ребристых плит на продавливание / А. В. Хапин, Б. Е. Махиев, Д. В. Веревкин // Вестник Казахской академии транс-



- порта и коммуникаций им. М. Тынышпаева. – 2020. – № 2(113). – С. 10-17. – DOI 10.52167/1609-1817-2020-113-2-10-17. – EDN NDRZGV.
13. Терехов, И. А. Ликвидация дефектов ребристых плит перекрытий и покрытий / И. А. Терехов, О. Л. Такташкина // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2022. – № 11-2(74). – С. 167-172. – DOI 10.24412/2500-1000-2022-11-2-167-172. – EDN CFZIDY.
14. Сейфуллаев, Х. К. Напряженно-деформированное состояние плит-оболочек переменной толщины с верхним плоским основанием / Х. К. Сейфуллаев, Г. Х. Джебраилова // Строительная механика и расчет сооружений. – 2017. – № 1(270). – С. 37-41. – EDN XWUHIT.
15. Пасхин, Д. В. Большепролетные сегментные своды из крупноразмерных железобетонных сводчатых панелей-оболочек / Д. В. Пасхин, Б. С. Соколов // Промышленное и гражданское строительство. – 2022. – № 4. – С. 51-56. – DOI 10.33622/0869-7019.2022.04.51-56. – EDN ZARUHS.
16. Пасхин, Д. В. Анализ технических параметров сборного большепролетного сегментного свода из панелей-оболочек КЖС / Д. В. Пасхин, Б. С. Соколов // Бетон и железобетон. – 2020. – № 2(602). – С. 19-27. – EDN CXGVGL.
17. Корчагина, Е. И. Изучение методики расчета вспарушенных монолитных железобетонных плит перекрытий с предварительным напряжением арматуры / Е. И. Корчагина // Научное обеспечение агропромышленного комплекса : сборник статей по материалам 72-й научно-практической конференции студентов по итогам НИР за 2016 год, Краснодар, 01 февраля – 01 2017 года. – Краснодар: Кубанский государственный аграрный университет имени И.Т. Трубилина, 2017. – С. 281-283. – EDN ZAEBZT.
18. Соколов, Б. С. Проектирование железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий в пособии к СП 387.1325800.2018 / Б. С. Соколов, В. А. Титаев, Д. В. Пасхин // Вестник НИЦ Строительство. – 2020. – № 4(27). – С. 97-106. – DOI 10.37538/2224-9494-2020-4(27)-97-106. – EDN OSTMTR.
19. Соколов, Б. С. Развитие норм проектирования железобетонных пространственных конструкций покрытий и перекрытий в России / Б. С. Соколов // Вестник НИЦ Строительство. – 2018. – № 1(16). – С. 92-100. – EDN YNSGDQ.
20. Патент на полезную модель № 166449 U1 Российская Федерация, МПК E04B 5/43. железобетонная плита-оболочка : № 2016131534/03 : заявл. 01.08.2016 : опубл. 27.11.2016 / А. В. Селиванов, Ф. Ф. Репер ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Сибирская государственная автомобильно-дорожная академия" (СибАДИ). – EDN ZHSWBN.
21. Селиванов, А. В. Результаты экспериментальных исследований железобетонной плиты-оболочки / А. В. Селиванов, Ф. Ф. Репер // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16, № 3(67). – С. 378-392. – EDN ZYRJZB.
22. Селиванов, А. В. О влиянии конструктивных особенностей на напряженно-деформированное состояние (НДС) железобетонной плиты-оболочки перекрытия / А. В. Селиванов, Ф. Ф. Репер, И. А. Чакурин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 3(85). – С. 446-460. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-3-446-460. – EDN OJINCL.
23. Селиванов, А. В. Исследование трещинообразования и предельного равновесия железобетонной плиты-оболочки перекрытия / А. В. Селиванов, Ф. Ф. Репер, И. А. Чакурин // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2022. – Т. 19, № 5(87). – С. 762-776. – DOI 10.26518/2071-7296-2022-19-5-762-776. – EDN XQZPKB.
24. СП 387.1325800.2018. Железобетонные пространственные конструкции перекрытий и покрытий. Правила проектирования.
25. Боровских А.В. К вопросу о проектировании железобетонных перекрытий зданий // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. 2005. № 12(83) С. 67–70.
26. Баранова Т.И., Сильванович Т.Г., Викторов В.Г., Бормотов А.Н. Пустотная панель покрытий производственных зданий // Известия ВУЗов. Строительство. 1995 № 11. С. 3 – 6.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 09.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 09.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья  
УДК 624.012.3  
ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_75

## РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ КОНТРОЛЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ БЕТОНОВ НА ОСНОВЕ ЦЕМЕНТНО-ДИАТОМИТОВЫХ ВЯЖУЩИХ МЕТОДОМ АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ

© Автор 2024  
SPIN-код: 3282-4758

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

**Аннотация.** Важнейшей задачей современного строительства является повышение эффективности, качества, экологической безопасности, надежности и долговечности конструкций и сооружений с учетом снижения материалоемкости и капитальных затрат. Существенную по объему и значимости группу строительных материалов составляют теплоизоляционные материалы. Использование в строительстве легких бетонов позволяет создавать ограждающие конструкции, отвечающие современным требованиям комфортности жилья, архитектуры, градостроительства, сокращать материалоемкость и затраты на возведение зданий и их эксплуатацию. Все большее применение получают ограждающие конструкции из ячеистых бетонов с высокими экологическими характеристиками. В работе приведены результаты исследования изготовления эффективных теплоизоляционных материалов на основе диатомитов путем формирования ячеистых структур в поле токов высокой частоты, а также обоснование принципов рецептурно-технологического регулирования их свойств. В процессе исследования изучены технологические режимы создания ячеистых структур источниками внутреннего тепла и разработана методика контроля и управления процессами структурообразования пористых материалов, получаемых по технологии внутреннего нагрева в полях СВЧ. Изученный метод контроля позволяет использовать средний температурный режим системы не превышающий оптимальной температуры гидратации при СВЧ-формовании ячеистых структур.

**Ключевые слова:** ячеистые бетоны; теплоизоляционные материалы; коэффициент конструктивного качества; акустическая эмиссия; звуковое давление; СВЧ-формование ячеистых структур

**Для цитирования:** Митрошин И.А. Разработка методов контроля технологического процесса структурообразования бетонов на основе цементно-диатомитовых вяжущих методом акустической эмиссии // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 75-79. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_75.

Original article

## DEVELOPMENT OF METHODS FOR CONTROLLING THE TECHNOLOGICAL PROCESS OF STRUCTURE FORMATION OF CONCRETE BASED ON CEMENT-DIATOMITE BINDERS BY ACOUSTIC EMISSION METHOD

© The Author 2024 **MITROSHIN Igor Alexandrovich**  
Ph.D., associate professor  
National Research Ogarev Mordovia State University  
(Russia, Saransk, e-mail: rniic@yandex.ru)

**Abstract.** The most important task of modern construction is to improve the efficiency, quality, environmental safety, reliability, and durability of structures and facilities, considering the reduction of material intensity and capital costs. Heat-insulating materials constitute a significant group of construction materials by volume and importance. The use of lightweight concrete in construction makes it possible to create enclosing structures that meet the modern requirements of housing comfort, architecture, urban planning, to reduce material intensity and costs of erecting buildings and their operation. Enclosing constructions from cellular concrete with high ecological characteristics are getting more and more application. The paper presents the results of research into the production of effective heat-insulating materials based on diatomites by forming cellular structures in the field of high frequency currents. The study also presents the substantiation of the principles of formulation and technological regulation of their properties. In the process of research, the technological modes of creation of cellular structures by sources of internal heat have been studied. The method of control and management of the processes of structure formation of porous materials obtained by the technology of internal heating in the fields of microwave currents has been developed. The studied control method allows using the average temperature mode of the system, not exceeding the optimum hydration temperature for microwave molding of cellular structures.



**Keywords:** cellular concrete; thermal insulating materials; structural quality factor; acoustic emission; sound pressure; microwave molding of cellular structures

**For citation:** Mitroshin I.A. Development of methods for controlling the technological process of structure formation of concrete based on cement-diatomite binders by acoustic emission method // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 75-79. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_75.

В современной технике широко используют токи высокой частоты (ТВЧ) и сверхвысокой частоты (СВЧ) для нагрева и сушки различных материалов во многих отраслях промышленности. В основном эти методы нагрева применяют для интенсификации технологического процесса. Однако для структурообразования ячеистого бетона и других ячеистых структур этот метод до настоящего времени не применялся.

Наличие простого метода получения пористой структуры, путем кипения растворов до выкипания избыточного количества влаги в полях ТВЧ и СВЧ даст возможность улучшить индустриальность производства ячеистых бетонов (и др. ячеистых структур, например фильтров сорбентов для нефтяной промышленности), сократить расход электроэнергии, удешевить компоненты необходимые для формирования ячеистых структур, уменьшить трудозатраты, повысить технологичность всего процесса и т. д.

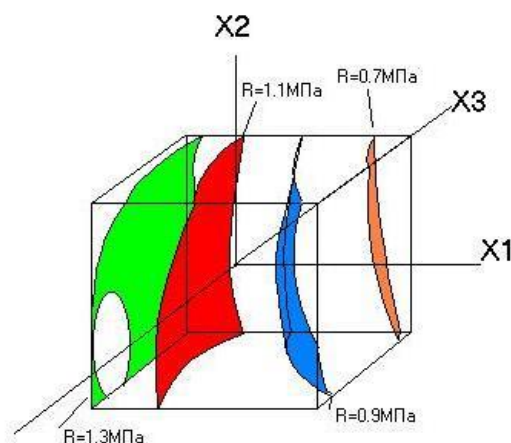
В данной работе приведены результаты экспериментальных исследований по разработке технологии получения ячеистых структур теплоизоляционных материалов источниками внутреннего нагрева. В качестве материалов применяемых для исследования была использована цементо-диатомитовая суспензия.

При высокочастотном формовании ячеистых структур использовались составы с завышенным В/Т, которые помещались в СВЧ-поле для интенсивного нагрева. При нагревании избыточное количество воды выкипало, за счет чего в процессе парообразования образовывалась ячеистая структура.

В качестве наполнителя использовался диатомит Атемарского месторождения (Республика Мордовия). Варьировали степень наполнения в следующих пределах: 30, 45, 60 % от твердого вещества. Фиксировали так же влияние следующих параметров: количество воды: 90, 95, 100 % от твердого вещества и время нагрева исследуемого материала в поле высокой частоты.

В результате проведенного трехфакторного эксперимента были получены зависимости, описывающие изменение прочности и средней плотности от количественного содержания компонентов смеси (Д/Т (диатомит от массы твердого вещества) –  $X_1$ , В/Т –  $X_2$ ) и времени СВЧ-нагрева –  $X_3$ . Анализ полученных результатов показал, что предел прочности при сжатии исследуемых материалов зависит в ос-

новном от степени наполнения диатомитом (рис. 1) [1-4].



**Рис. 1.** Поверхность изменения прочности ячеистых бетонов, наполненных диатомитом в зависимости от содержания диатомита  $X_1$ , В/Т отношения  $X_2$ , и времени нагрева  $X_3$

При этом время нагрева смеси и не оказывает существенного влияния на исследуемую характеристику (рис.1). Максимальные значения данной характеристики зафиксированы для составов содержащих диатомит в количестве 30 % от массы твердого вещества. Средняя плотность исследуемых материалов снижается с увеличением степени наполнения диатомитом.

Эффективность полученных СВЧ-бетонов оценивали по коэффициенту конструктивного качества. Анализ значений коэффициента конструктивного качества показывает что, он соответствует данной характеристике для ячеистых бетонов. Максимальные значения коэффициента конструктивного качества получены для составов с 30 % степенью наполнения диатомитом [5-6].

На структуру порового пространства исследуемого материала большое влияние оказывают технологические параметры изготовления, такие как – фильтрация пара, состав, сроки выдерживания теста перед формированием, количество затворяемой воды, количество фракций наполнителя и их размер.

Предлагаемый процесс формирования ячеистой структуры высокоинтенсивен, поэтому требует высокоточных средств контроля и управления. Для анализа процессов образования поровой структуры и контроля технологического процесса образования пор использовался метод акустической эмиссии [7-8].



Данный метод основан на измерении акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот, что позволяет четко фиксировать картину всех звуковых параметров кипения и анализировать образование пористых структур.

Результаты обрабатывались при помощи широко распространенного музыкального редактора Cool Edit Pro, что оказалось достаточно, чтобы анализировать происходящий процесс. В программе есть модуль, определяющий полную статистическую характеристику звукового шума – энергетического спектра. Встроенный анализатор программы Cool Edit Pro позволяет в реальном времени фиксировать появление высокочастотных шумов, сопровождающих структурообразование, что позволяет различить технологические шумы (шумы от печи и др. техники) от шумов кипения.

Визуально процесс легко контролировать при использовании спектрального представления виброграммы, когда интенсивность сигнала отмечается различными цветами. Известно, что во время кипения пузырьки пара издают звук, интенсивность которого зависит от температуры исследуемого вещества. Полученный энергетический спектр звукового шума (рис. 2.) показывает, как изменяется звуковое давление при формировании ячеистой структуры в режиме кипения. Это позволяет контролировать образование порового пространства при применении различных режимов формования.

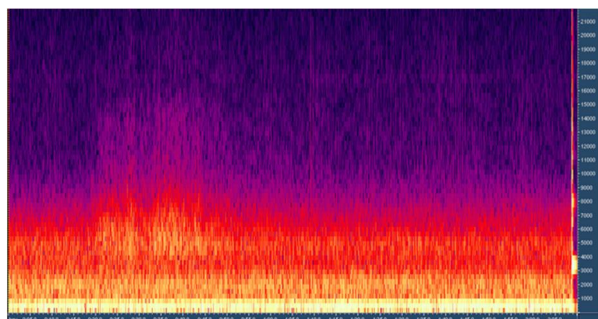


Рис. 2. - Энергетический спектр звука.

В работе при контроле технологического процесса образования пор, предложено применить измерение акустической эмиссии в звуковом диапазоне частот, что позволило четко фиксировать картину всех звуковых параметров кипения и анализировать образование пористых структур.

При изучении шумов кипения применяются четыре вида измерений:

- интегральной интенсивности в заданной полосе частот,
- звуковых импульсов, порождаемых отдельными пузырьками пара,
- частотного (энергетического) спектра шума,
- амплитудного спектра импульсов, генерируемых паровыми пузырьками.

Звуковые импульсы, возникающие при образовании паровых пузырьков регистрировались при помощи электретного микрофона, подающего сигнал на вход звуковой карты компьютера с характеристиками:

- частотный диапазон 35Гц-16КГц,
- полное сопротивление 2кОм,
- максимальная входящая сила тока 0,5 мА,
- чувствительность 0дБ=1В/Па на 1КГц-68дБ.

Принимаемый сигнал преобразуется встроенным кодеком звуковой карты с частотой дискретизации 44.1 КГц, 16 бит, моно. Такой частоты оказалось достаточно для анализа спектра шумов, излучаемых при кипении. Естественно, при записи недопустимо применение сжимающих алгоритмов, так как они внесут дополнительную погрешность, поэтому сигнал записывался в wav-формате (Windows PCM). При этом файл, записывающий двухминутный процесс структурообразования занимает 10-12Мб.

Известно, что во время кипения пузырьки пара издают звук, интенсивность которого зависит от температуры исследуемого вещества. Полученный энергетический спектр звукового шума (рис. 3) показывает, как изменяется звуковое давление при формировании ячеистой структуры в режиме кипения. Это позволяет контролировать образование порового пространства при применении различных режимов формования.

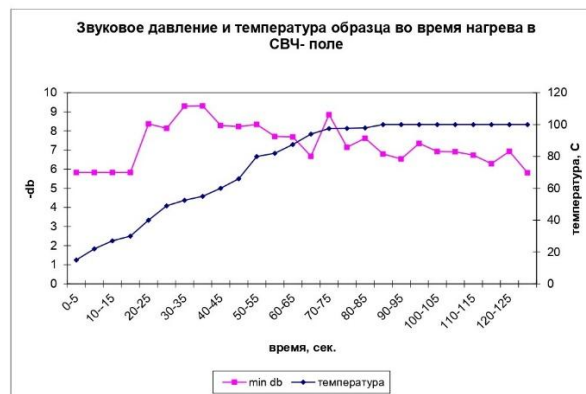


Рис. 3. Звуковое давление и температура образца во время нагрева в СВЧ-поле

Согласно Х. Тейлора, для оптимальной степени гидратации, температура цементного связующего не должна превышать 900С. Температура кипения воды при порообразовании в материале, в СВЧ-поле, равна 1000С. В бинарной системе, согласно теории А.В. Лыкова, свободная вода закипает раньше, чем весь раствор. На начальном отрезке времени от 0 до 20 секунд (рис. 2) показан шумовой фон печи, который составляет 5,8-dB, затем, в точке 25 сек наблюдается всплеск звукового давления, который указывает на то, что вода начала кипеть. При этом средняя температура материала (кривая 2) до-



стигла всего 500С, что позволяет нам не превышая температуру гидратации, оставлять часть воды для дальнейшего роста прочности.

В зависимости от области использования получаемого пористого материала, можно регулировать параметры его порового пространства, так как для теплоизоляционных материалов необходимо иметь большее количество закрытых пор, а отделочных звукопоглощающих материалов больше – открытых пор. Для контроля порообразования были получены зависимости образования пористости (%) и давления звука от времени формования. Анализ экспериментальных кривых показал, что с увеличением давления звука общая пористость возрастает. На участке 45-75 сек наблюдается спад интенсивности энергетического спектра, давление звука падает с 9,5-db до 6,7-db. Это связано с тем, что избыточное количество влаги испарилось, что приводит к увеличению жесткости системы и началу образования наибольшего объема закрытых пор (рис. 3). При дальнейшем нагреве температура образца повышается до 90°С, время нагрева – 75-110 сек, начинается тепломассообмен всей системы. Пузырьки пара, с трудом преодолевая сопротивление образовавшейся матрицы, выходят на поверхность образца. При этом образуются открытые поры, так как подвижность системы резко уменьшилась и становится невозможным «захлопывание» образовавшегося пространства. Данный процесс вызывает новый пик звукового давления – 9-db, время нагрева – 75-80 сек. Далее звуковое давление уменьшается, так как отток пара происходит в результате фильтрации матрицы образца и выходит образовавшиеся открытые поры, т.е. начался процесс сушки. Это отрицательно влияет на получаемый материал, так как недостаточное количество гидратационной воды приводит к уменьшению прочности цементного камня. На рисунке 4 показано изменение средней температуры и потери массы образца. Анализ экспериментальных кривых показал, что потери по массе начинаются с 25 секунд, при этом, температура образца достигает 40°С. Это подтверждает то, что кипение воды в исследуемой системе наступает раньше, чем происходит тепломассообмен всей системы [9].

Анализ вышеизложенных результатов позволяет предложить новую технологию образования пористых материалов [10]. На основе данного метода СВЧ-формования ячеистых структур можно использовать средний температурный режим системы не превышающий оптимальной температуры гидратации. Используя метод акустической эмиссии можно контролировать параметры образования порового пространства структуры материалов.

Данный метод контроля позволяет использовать средний температурный режим системы, не

превышающий оптимальной температуры гидратации при СВЧ-формовании ячеистых структур.

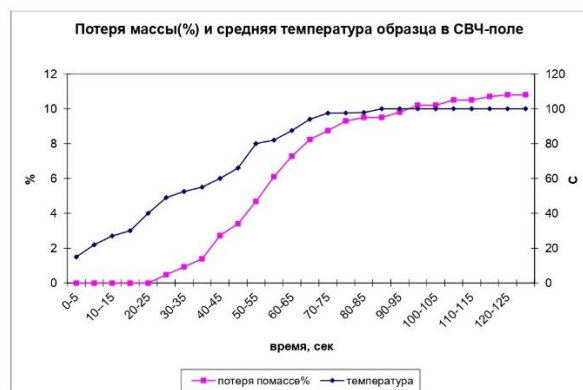


Рис. 4. Потеря массы (%) и средняя температура образца в СВЧ-поле

В результате проведенных исследований разработана технология получения ячеистых структур теплоизоляционных материалов источниками внутреннего нагрева. Данный метод формования позволяет получать экологически чистые материалы, т.к. не требует введения пено- и газообразователей. Используя метод акустической эмиссии можно осуществлять контроль за структурообразованием пористых материалов, получаемых по технологии внутреннего нагрева положительными источниками тепла. Данный метод основан на применении простых и доступных компьютерных технологий, что позволяет существенно снизить затраты на контрольно-измерительные приборы.

#### Библиографический список

1. Митрошин, И. А. Теплоизоляционные материалы на основе диатомита : специальность 05.23.05 "Строительные материалы и изделия" : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Митрошин Игорь Александрович. – Саранск, 2007. – 163 с. – EDN NOQZYH.
2. Митрошин, И.А. Вывод приближенных формул для расчета оптимальных размеров изделий при формовании ячеистых структур в поле высокой частоты / И.А. Митрошин, Н.А. Зеленева, М.А. Макарова // Современные технологии строительных материалов и конструкций: Материалы Всероссийской науч.-техн. конференции поев. 150-летию со дня рождения акад. В.Г. Шухова. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2003. - С.93-95
3. Митрошин И.А. Пенoкeрaмикa пoлучeннaя из нeпрoрeaгирoвaвших чaстиц диaтoмитa aтeмaрскoгo мeстoрoждeния // Aктуaльнe вoпpocы eстeствeнных и тeхничeских нaук. Мeжвуз. сбopник нaучных тpyдoв. Вып.1. - Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2000. - С.84-85.
4. Митрошин, И.А. Использование классической теории массообмена в структурообразовании ячеистого бетона / И.А. Митрошин, Н.А. Зеленева, М.А. Макарова // Актуальные вопросы строительства. Вып.1: Материалы Всерос. науч.-техн. конф., посвящ. 40-летию строит, фак.



Мордов. ун-та. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. - С.278-282.

5. Селяев, В. П. Анализ ячеистых структур теплоизоляционных материалов, сформированных внутренними источниками тепла / В. П. Селяев, И. А. Митрошин // Долговечность строительных материалов, изделий и конструкций : Материалы Всероссийской научно-технической конференции, посвященной 70-летию заслуженного деятеля науки Российской Федерации, академика РААСН, доктора технических наук, профессора Селяева Владимира Павловича, Саранск, 20–22 ноября 2014 года / Редколлегия: В.В. Петров, Е.М. Чернышов, Г.В. Мурашкин, С.Н. Леонович, А.М. Сулейманов, С.М. Анпилов, Т.А. Низина (ответственный редактор). – Саранск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва", 2014. – С. 210-215. – EDN TLXJCP.

6. Митрошин И.А. Пористые наполнители на основе диатомита, полученные методом СВЧ - нагрева из отходов производства жидкого стекла. // Актуальные вопросы строительства: материалы пятой всероссийской науч.-техн. конф. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2006. -С.338 - 340.

7. Митрошин И.А. Изучение акустической эмиссии в режимах формования пористых структур. // предотвра-

щение аварий зданий и сооружений. Сборник, посвященный 60-летию архитектурно-строительного факультета Магнитогорского ГТУ им. Г.И. Носова. Магнитогорск: Изд-во МаГТУ, 2002. - С.133-135.

8. Митрошин И.А. Разработка высокотехнологичных процессов образования ячеистых структур с применением внутренних источников тепла. // Проблемы строительного материаловедения: Первые Соломатовские чтения: Материалы Всероссийской научно-технической конференции. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2002. - С.243-245.

9. Митрошин И.А. Исследование акустической эмиссии при высокочастотном формовании ячеистых структур наполненных цементных композиций. /В.П. Селяев // Достижения, проблемы и перспективные направления развития теории и практики строительного материаловедения. Десятые Академические чтения РААСН. - Казань: Изд-во КГ АСУ, 2006. - С.65-68.

10. Патент № 2358933 С1 Российская Федерация, МПК С04В 28/00. Способ получения ячеистой структуры : № 2008105237/03 : заявл. 11.02.2008 : опубл. 20.06.2009 / В. П. Селяев, И. А. Митрошин, Л. И. Куприяшкина [и др.] ; заявитель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева". – EDN MPQZHI.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 01.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья  
УДК 692.412 : 551.5  
ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия  
doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_80

**КОМПЛЕКСНЫЙ АНАЛИЗ КОЛИЧЕСТВЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ  
ДЛЯ УМЕРЕННОГО, СУБТРОПИЧЕСКОГО, ЭКСТРЕМАЛЬНО ХОЛОДНОГО И АРКТИЧЕСКОГО КЛИМАТОВ**

© Авторы 2024

SPIN: 7494-0840

ORCID: 0000-0002-2328-6238

ScopusID: 57190161363

ResearcherID: B-1228-2017

SPIN: 5865-8774

ORCID: 0009-0002-7394-7353

**НИЗИНА Татьяна Анатольевна**

доктор технических наук, профессор

ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»

(Россия, Саранск, e-mail: nizinata@yandex.ru)

**ЧИБУЛАЕВ Игорь Александрович**

аспирант

ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»

(Россия, Саранск, e-mail: chibulaev98@mail.ru)

SPIN: 9332-6318

ORCID: 0000-0001-8762-5369

SCOPUS ID: 57190172059

ResearcherID: P-2639-2017

**НИЗИН Дмитрий Рудольфович**

кандидат технических наук

ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»

(Россия, Саранск, e-mail: nizindi@yandex.ru)

SPIN: 6486-7164

ORCID: 0009-0008-5728-8814

**СПИРИН Илья Петрович**

аспирант

ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»

(Россия, Саранск, e-mail: spirinil2000@yandex.ru)

SPIN: 9739-9569

ORCID: 0009-0002-6804-5654

**ПИВКИН Николай Андреевич**

магистрант

ФГБОУ ВО «НИ МГУ им. Н.П. Огарёва»

(Россия, Саранск, e-mail: 5927401@mail.ru)

**Аннотация.** В статье проанализированы количественные показатели изменения температуры и относительной влажности окружающего воздуха умеренного, экстремально холодного, арктического и субтропического климатов, зафиксированные на метеостанциях в г. Саранск, г. Якутск, пос. Тикси и г. Геленджик в 2019 – 2023 годах. Проанализировано изменение минимальных, средних и максимальных значений, а также кривых распределения температуры и относительной влажности окружающего воздуха в зависимости от месяца для 2022 года. Приведено распределение температуры и относительной влажности в течение календарного года на тепловых картах, а также картах комплексного воздействия данных метеорологических показателей для четырех вышеуказанных климатических зон за 2019-2023 гг.

**Ключевые слова:** климатический пояс; климатическая зона; метеорологические параметры; температура воздуха; относительная влажность воздуха; тепловая карта; кривая распределения; карта распределения

**Благодарности:** работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2024-0095).

**Для цитирования:** Комплексный анализ количественных значений метеорологических факторов для умеренного, субтропического, экстремально холодного и арктического климатов / Т.А. Низина, И.А. Чибулаев, Д.Р. Низин, И.П. Спиринов, Н.А. Пивкин // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 80-87. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_80.



Original article

COMPREHENSIVE ANALYSIS OF QUANTITATIVE VALUES OF METEOROLOGICAL FACTORS  
FOR TEMPERATE, SUBTROPICAL, EXTREMELY COLD AND ARCTIC CLIMATES

© The Author(s) 2024

**NIZINA Tatiana Anatolyevna**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
*National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev*  
(Russia, Saransk, e-mail: nizinata@yandex.ru)

**CHIBULAEV Igor Alexandrovich**

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

**NIZIN Dmitry Rudolfovich**

Candidate of Technical Sciences  
*National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev*  
(Russia, Saransk, e-mail: nizindi@yandex.ru)

**SPIRIN Ilya Petrovich**

PhD Candidate  
*National Research Mordovian State University named after N.P. Ogarev*  
(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 article analyzes quantitative indicators of change in temperature and relative humidity of the ambient air of moderate, extremely cold, Arctic and subtropical climates recorded at weather stations in Saransk, Yakutsk, the village Tiksi and Gelendzhik between 2019 and 2023. The minimum, average, and maximum values, as well as temperature and relative humidity distribution curves, are analyzed depending on the month of 2022. The distribution of temperature and relative humidity of the air during the calendar year was revealed on heat maps, as well as on maps of the complex impact of these meteorological indicators for the four above-mentioned climatic zones in 2019-2023.

**Keywords:** climatic belt; climatic zone; meteorological parameters; air temperature; relative air humidity; heat map; distribution curve; distribution map

**Acknowledgments:** the work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (topic no. FWRS-2024-0095).

**For citation:** Comprehensive analysis of quantitative values of meteorological factors for temperate, subtropical, extremely cold and arctic climates / T.A. Nizina, I.A. Chibulaev, D.R. Nizin, I.P. Spirin, N.A. Pivkin // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 80-87. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_80.

**Введение.** Оценка влияния природных климатических факторов на целостность и сохранность эксплуатационных показателей строительных материалов, изделий и конструкций на их основе является важным критерием для обеспечения требуемой долговечности зданий и сооружений различного назначения. При этом обоснованный подход при выборе элементов конструкций, без сомнений, не может осуществляться без учета конкретных климатических условий района строительства [1-4].

Территория России простирается более чем на 10 тысяч километров с запада на восток и 4 тысячи километров с севера на юг и разделена на четыре климатических пояса – арктический, субарктический, умеренный и субтропический, характеризующихся существенно различными климатическими условиями [5-7]. Для каждого климатического пояса характерны зональные типы климата, располагающиеся с севера на юг. Они оказывают решающее влияние на формирование растительности и называются по её



господствующему типу. С запада на восток размещаются климатические области, получившие название по типу господствующих воздушных масс.

Арктический пояс занимает самое северное положение; климат Арктики характеризуется сильными ветрами и метелями в зимний период, которые создают ощущение более низкой температуры, чем фактически действующая. В целом, климат Арктики, особенно восточные области, относят к суровому (экстремальному) и дискомфортному для проживания. При этом в западной части арктического пояса находится Мурманск – незамерзающий порт, средние январские температуры для которого выше, чем в Москве.

Субарктический пояс – переходный от арктического к умеренному поясу, значительно расширяющийся к востоку. В летний период сюда приходят более теплые воздушные массы умеренных широт, а в зимний период господствуют арктические воздушные массы, поэтому зимы долгие, холодные (в восточных районах суровые) с малым количеством осадков. Наиболее низкие температуры наблюдаются в Якутии (до  $-40...-50$  °C); в сибирской и европейской частях субарктического пояса температуры, как правило, не снижаются ниже, соответственно,  $-20$  и  $-4$  °C.

Умеренный пояс занимает самую большую площадь в пределах Российской Федерации. Здесь господствуют воздушные массы умеренных широт, а на северных и южных границах формируются атмосферные фронты с арктическими и тропическими воздушными массами соответственно. В пределах умеренного пояса выделяются пять типов климата, сменяющих друг друга с запада на восток:

– умеренно-континентальный климат (европейская часть России) – теплое лето (до  $+24$  °C), мягкая зима (от  $-4$  до  $-20$  °C) с частыми оттепелями;

– континентальный климат (районы Западной Сибири и Прикаспия) – относительно малое количество осадков, стабильно жаркое лето на юге, достаточно теплое лето на севере ( $+15...+25$  °C), холодная зима ( $-15...-25$  °C);

– резко континентальный климат (юг Сибири) – солнечное и теплое лето ( $+16...+20$  °C) и очень суровая зима ( $-25...-45$  °C);

– муссонный климат (Дальний Восток) – резкая смена влажности по сезонам года: лето прохладное ( $+10...+20$  °C) и влажное, зима сухая, ясная и холодная ( $-20...-27$  °C);

– морской климат (восточные побережья Дальнего Востока – полуостров Камчатка, северное побережье Охотского моря) – похож на муссонный, но с меньшей амплитудой температур: летом прохладнее, зимой немного теплее.

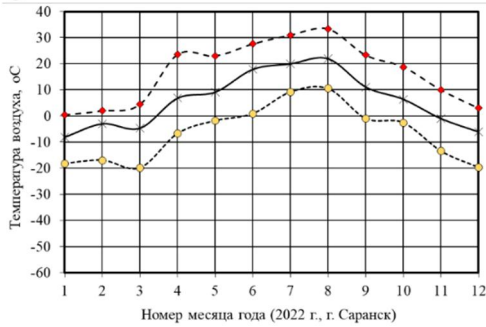
Субтропический пояс характеризуется сменой воздушных масс по сезонам года и самыми высо-

кими показателями суммарной солнечной радиации. Зимой здесь господствует более прохладный воздух умеренных широт, поэтому зимы теплые и влажные, температуры преимущественно положительные. Летом приходит жаркий и сухой воздух из тропиков, поэтому лето длинное, жаркое (до  $+32$  °C) и засушливое. Субтропический пояс представлен сухими и влажными субтропиками. В пределах России представлены сухие субтропики, к которым относятся северная часть Черноморского побережья Кавказа и Южный берег Крыма. Количество осадков и некоторые температурные характеристики на этих территориях зависят от положения относительно Черного моря и преобладающего рельефа.

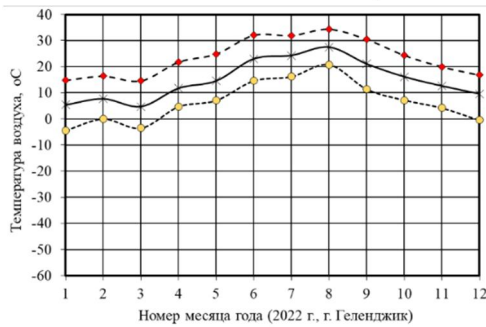
Комплексное воздействие метеорологических факторов окружающей среды, характерных конкретному климатическому поясу (или климатической зоне), является одним из ключевых параметров, оказывающих влияние на выбор оптимального состава и срок эксплуатации строительных материалов [8-11]. К таким факторам относятся: температура воздуха, атмосферное давление, относительная влажность воздуха, направление и скорость ветра, облачность, количество выпавших осадков и другие [12-13].

Учитывая наличие метеорологических станций, планируемых к использованию в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2024-0095), в данной работе авторским коллективом было проанализировано изменение температуры и относительной влажности окружающего воздуха для четырех различных климатов: умеренно континентального (г. Саранск), субтропического (г. Геленджик), экстремально холодного (г. Якутск) и арктического (пос. Тикси).

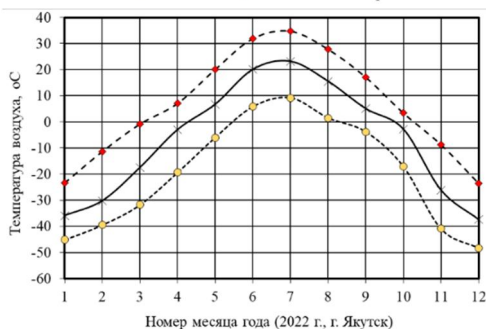
**Результаты.** Для анализа распределения метеорологических параметров в работе использовались архивные климатические данные [14], зафиксированные на метеостанциях в г. Саранск, г. Геленджик, г. Якутск и пос. Тикси в 2019 – 2023 гг. Фиксация показаний, согласно Наставлениям гидрометеорологическим станциям и постам [15], выполнялась в сроки 00, 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21 ч среднего гринвичского времени, что соответствует 03, 06, 09, 12, 15, 18, 21, 24 ч московского зимнего времени. Графическая интерпретация показателей изменения минимальной, средней и максимальной температуры окружающего воздуха на примере 2022 года в умеренно континентальном (а), субтропическом (б), экстремально холодном (в) и арктическом (г) климатах представлена на рисунке 1. Для умеренно континентального и субтропического климатов (а, б) максимальное значение температуры зафиксировано в июле и составляет 33,3 и 34,4 °C соответственно. В экстремально холодном (в) климате значение макси-



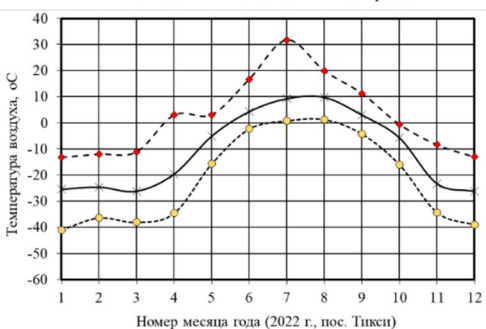
а)



б)



в)

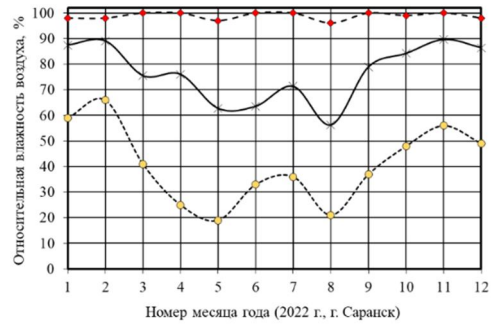


г)

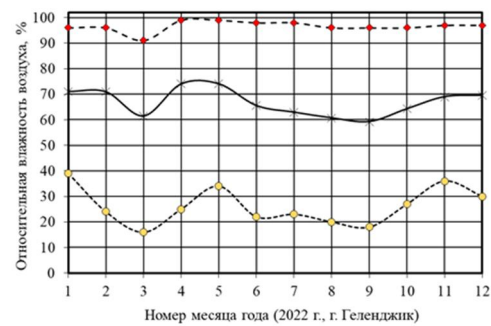
**Рисунок 1 – Изменение минимальной, средней и максимальной температуры окружающего воздуха в зависимости от месяца 2022 года** в умеренно континентальном (а), субтропическом (б), экстремально холодном (в) и арктическом (г) климатах

максимальной температуры достигается в июле и составляет 34,7°C, в арктическом (г) – 31,7 °С. Значения минимальных температур для различных климатических зон (рисунок 1) составляют, соответственно, -19,9; -4,4; -48,3 и -41,0 °С. Таким образом, наименьший диапазон изменения температуры в течение года характерен для г. Геленджик (субтропический

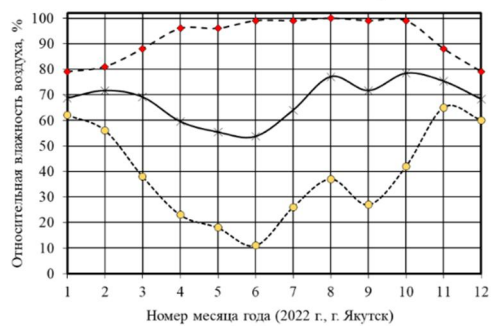
климат), наибольший – для г. Якутск (экстремально холодный климат).



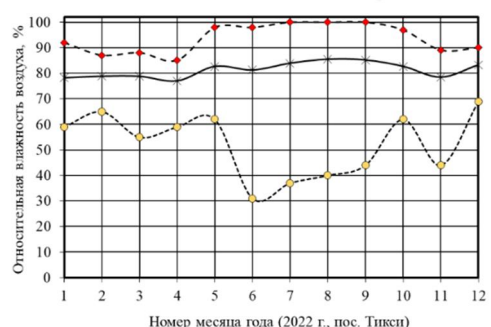
а)



б)



в)



г)

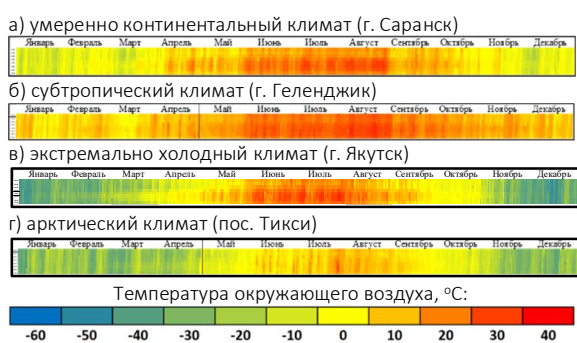
**Рисунок 2 – Изменение минимальной, средней и максимальной относительной влажности окружающего воздуха в зависимости от месяца 2022 года** в умеренно континентальном (а), субтропическом (б), экстремально холодном (в) и арктическом (г) климатах

Анализ изменения относительной влажности окружающего воздуха (рисунок 2) в умеренно континентальном (а), субтропическом (б), экстремально холодном (в) и арктическом (г) климатах показал, что



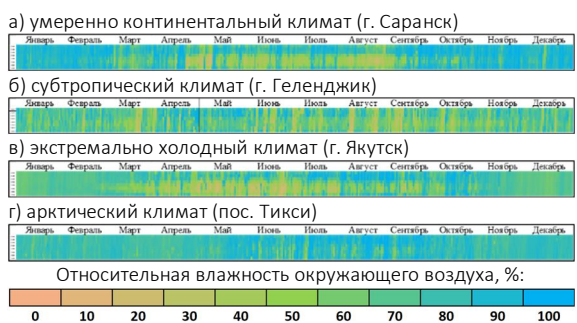
наибольший разброс показателя (от 11 до 100%) зафиксирован для г. Якутск (в), наименьший – для пос. Тикси (г), где значения относительной влажности в 2022 году не снижаются ниже 31%.

Наиболее наглядно распределения температуры и относительной влажности окружающего воздуха в течение одного календарного года отражаются на тепловых картах, представленных на рисунках 3 и 4. Для субтропического климата характерно преобладание плюсовых температур, приближение к нулевым и отрицательным значениям с декабря по март (рисунок 3, а). В арктическом климате (рисунок 3, г) наблюдается короткий летний период с плюсовыми температурами, преобладает диапазон отрицательных температур.



**Рисунок 3 – Тепловые карты распределения температуры окружающего воздуха**

в умеренно континентальном (а), субтропическом (б), экстремально холодном (в) и арктическом (г) климатах (2022 год)



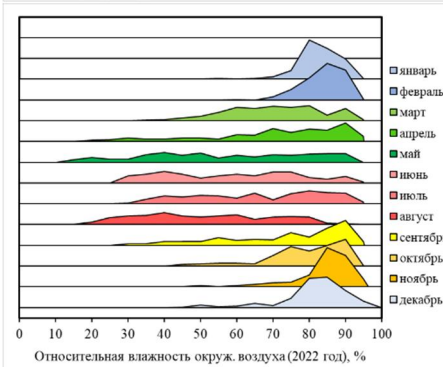
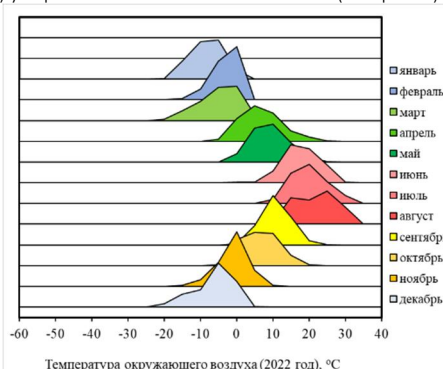
**Рисунок 4 – Тепловые карты распределения относительной влажности воздуха**

в умеренно континентальном (а), субтропическом (б), экстремально холодном (в) и арктическом (г) климатах (2022 год)

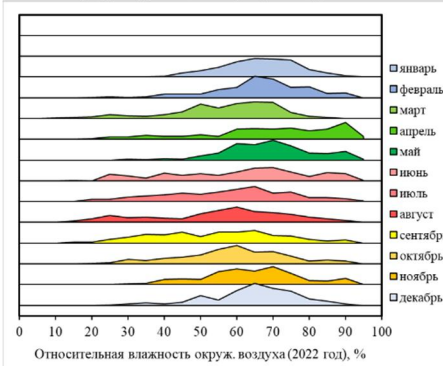
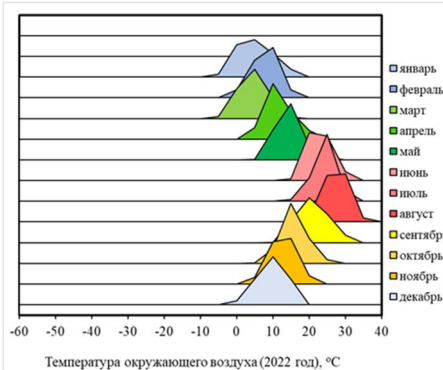
Для умеренно континентального климата (рисунок 4, а) в период с октября по февраль значения относительной влажности наиболее распространены в области 90...100%, а в период с марта по сентябрь наблюдается понижение значений до 20%. Тепловая карта для субтропического климата (рисунок 4, б) имеет переменный характер на протяжении всего года с диапазоном значений от 16% до 100%. В экстремально холодном климате (рисунок 4, в) относительная влажность понижается в период с марта по сентябрь и достигает 11% в июне. Арктический климат характеризуется преобладанием высоких

значений относительной влажности на протяжении всего года с редкими понижениями в период с июня по сентябрь.

а) умеренно континентальный климат (г. Саранск)



б) субтропический климат (г. Геленджик)

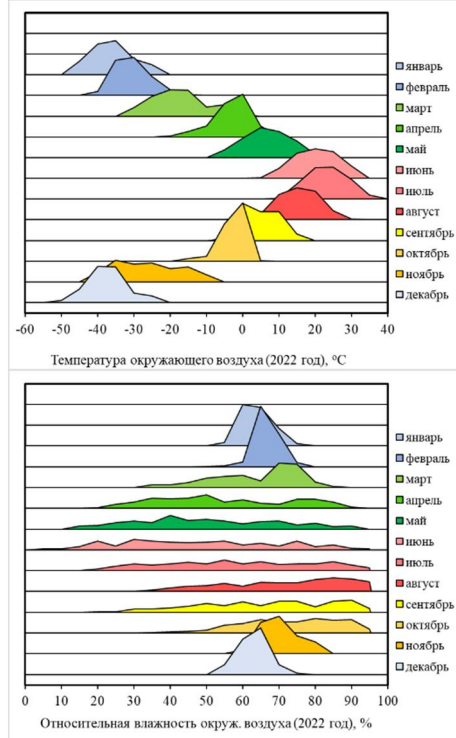


**Рисунок 5 – Кривые распределения температуры и относительной влажности окружающего воздуха в зависимости от месяца 2022 года**

в умеренно континентальном (а), субтропическом (б) климатах



а) экстремально холодный климат (г. Якутск)



б) арктический климат (пос. Тикси)

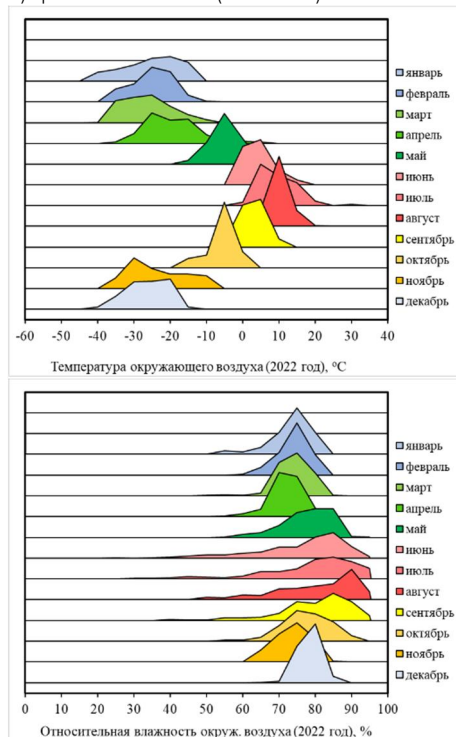


Рисунок 6 – Кривые распределения температуры и относительной влажности окружающего воздуха в зависимости от месяца 2022 года

в экстремально холодном (а) и арктическом (б) климатах

Кривые распределения, представленные на рисунках 5 и 6 наглядно иллюстрируют распределение характеристик относительной влажности и температуры в зависимости от календарного месяца и анализируемого региона. На данных графиках отчет-

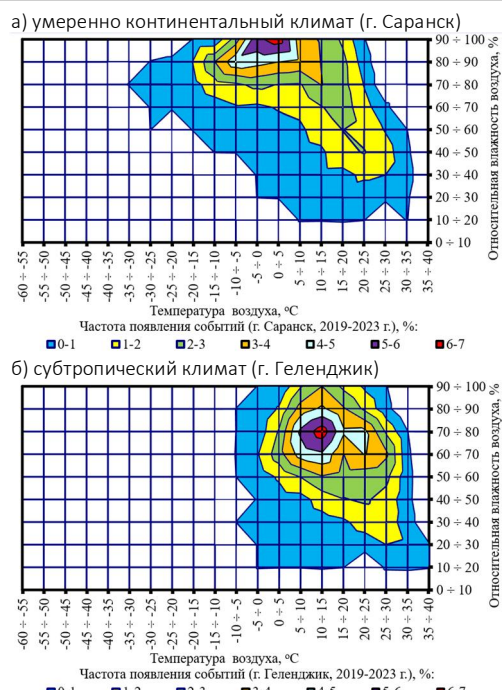
ливо видно влияние климатической зоны на показатели температуры и относительной влажности окружающего воздуха.

Кривые распределения температуры для всех четырех регионов имеют вид, близкий к нормальному (в ряде случаев – логарифмически нормальному). Распределение относительной влажности в умеренно континентальном (рисунок 5, а) и экстремально холодном (рисунок 6, а) климатах с ноября по февраль близко к нормальному. Для месяцев с марта по октябрь наблюдается варьирование данного показателя в широком диапазоне величин, что отражается и на форме кривых распределения. В субтропическом климате (рисунок 5, б) значительный разброс показателей относительной влажности наблюдается практически для всех месяцев календарного года.

В реальных условиях эксплуатации строительные материалы, изделия и конструкции подвергаются совместному воздействию природных климатических факторов, поэтому и их анализ целесообразно проводить не по отдельности, а комплексно. Очевидно, что температура и относительная влажность воздуха являются, в определенной степени, взаимозависимыми метеорологическими параметрами. Относительная влажность представляет собой соотношение плотности пара при определенной температуре к плотности насыщенного пара, выраженное в процентах; при повышении температуры окружающего воздуха уменьшается процент относительной влажности ввиду испарения влаги. Карты распределения температуры и относительной влажности воздуха за 2019 – 2023 годы в четырех климатических зонах представлены на рисунках 7 и 8.

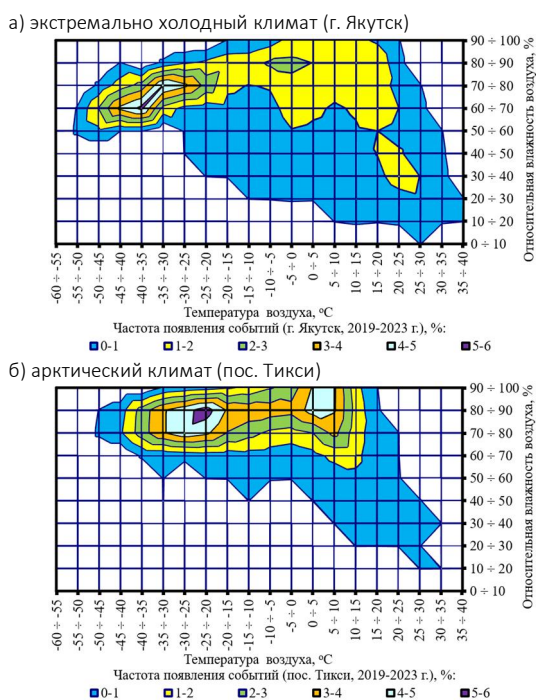
Для умеренно континентального климата (г. Саранск) наибольшая частота появления событий, достигающая 6-7%, наблюдается при температуре окружающего воздуха  $0 \div 5$  °C и относительной влажности  $90 \div 100\%$  (рисунок 7, а). Для субтропического климата (г. Геленджик), исходя из построенной тепловой карты видно, что по сравнению с умеренно континентальным климатом диапазон изменения температуры меньше, а частота событий, также составляющая 6-7%, сосредоточена в области  $10 \div 15$  °C и  $70 \div 80\%$  (рисунок 7, б).

Анализируя представленные на рисунке 8 карты для экстремально холодного и арктического климата можно отметить, что для данных климатических районов наблюдается значительно более широкая область покрытия возможных уровней температуры и относительной влажности окружающего воздуха, что связано, в первую очередь, с близким к 100 °C изменением температуры для экстремально холодного климата. Карта, построенная для г. Якутск (2019 – 2023 гг.), имеет самый широкий спектр значений как температуры (от -51,9 до 35,9 °C), так и от-



**Рисунок 7 – Карты распределения температуры и относительной влажности окружающего воздуха в умеренно континентальном (а) и субтропическом (б) климатах (2019 – 2023 гг.)**

носительной влажности (от 10 до 100%). Области с наиболее часто встречающимися климатическими показателями (5-6% от общего числа комбинаций) зафиксированы при температуре -40...-30 °С и относительной влажности 60...80%.



**Рисунок 8 – Карты распределения температуры и относительной влажности окружающего воздуха в экстремально холодном (в) и арктическом (г) климатах (2019 – 2023 гг.)**

Для арктического климата (пос. Тикси) характерен меньший диапазон температуры и влажности, но частота событий, достигающая 2-4% имеет значительно большую область на карте (рисунок 8, б). Наиболее часто, с вероятностью 5-6%, значения температуры и влажности встречаются в границах -25...-20°С и 80...90% соответственно.

### Выводы

На основе проведенного анализа выявлено распределение температуры и относительной влажности окружающего воздуха для четырех различных климатических зон Российской Федерации: умеренного континентального, экстремально холодного, арктического и субтропического. Выявлено существенное изменение кривых распределения в зависимости от месяца календарного года, а также климатической зоны. Построены карты распределения температуры и относительной влажности отдельно для каждой исследуемой климатической зоны, выявлены области наиболее частых комбинаций вышеуказанных климатических факторов.

В рамках реализации государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема №FWRS-2024-0095) фиксация показаний для дальнейших исследований, связанных с оценкой климатической стойкости полимерных материалов, будет осуществляться с помощью автоматических метеостанций, установленных во всех четырех вышеперечисленных климатических зонах (частота фиксации показаний будет составлять 20 минут).

### Библиографический список

1. Review of accelerated ageing methods and lifetime prediction techniques for polymeric materials / A. S. Maxwell, W. R. Broughton, G. Dean, G. D. Sims // NPL Report DEPC MPR 016 – 2005. – 84 p.
2. Старцев, В. О. Сорбция и диффузия влаги в полимерных композитных материалах с ударными повреждениями / В. О. Старцев, С. В. Панин, О. В. Старцев // Механика композитных материалов. – 2015. – Т. 51, № 6. – С. 1081-1094. – EDN VDTDJT.
3. Изменение влагосодержания образцов эпоксидных полимеров в условиях натурального климатического старения / Д. Р. Низин, Т. А. Низина, В. П. Селяев [и др.] // Климат-2021: современные подходы к оценке воздействия внешних факторов на материалы и сложные технические системы : Материалы VI Всероссийской научно-технической конференции, Москва, 20–21 мая 2021 года. – Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов, 2021. – С. 41-52. – EDN PWFUFZ.
4. 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 [и др.] // Эксперт: теория и практика. – 2022. – № 1(16). – С. 37-45. – DOI 10.51608/26867818\_2022\_1\_37. – EDN YNWSZW.



5. Алисов, Б.П. Климатология / Б.П. Алисов, Б.В. Полтараус // Изд. второе, переработ. и дополн. – М.: Изд-во Московского университета, 1974. – 299 с.
6. Дроздов, О.А. Климатология / О.А. Дроздов, В.А. Васильев, Н.В. Кобышева, А.Н. Раевский, Л.К. Смекалова, В.П. Школьный. М.: Гидрометеиздат, 1989. – 568 с.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2022 год. – М., 2023. – 104 с.
8. Низина, Т. А. Климатическая стойкость эпоксидных полимеров в умеренно континентальном климате / Т. А. Низина, В. П. Селяев, Д. Р. Низин. – Саранск : Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2020. – 188 с. – ISBN 978-5-7103-4081-3. – EDN EEGAGA.
9. Каблов, Е. Н. Старение полимерных композиционных материалов / Е. Н. Каблов, В. О. Старцев, А. Б. Лаптев. – Москва : Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов НИЦ "Курчатовский институт", 2023. – 536 с. – ISBN 978-5-905217-90-6. – EDN FRJUIJ.
10. Климатические испытания строительных материалов / О. А. Аммосова, Ф. И. Бабенко, А. Н. Блазнов [и др.]. – Москва : Издательство АСВ, 2017. – 558 с. – ISBN 978-5-4323-0240-3. – EDN ZMSUFT.
11. 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(51). – С. 47-58. – DOI 10.18577/2071-9140-2018-0-2-47-58. – EDN UOPPLH.
12. Большие данные при прогнозировании климатической стойкости строительных материалов. I. Температура и влажность воздуха / Т. А. Низина, Д. Р. Низин, В. П. Селяев [и др.] // Строительные материалы и изделия. – 2023. – Т. 6, № 3. – С. 18-30. – DOI 10.58224/2618-7183-2023-6-3-18-30. – EDN HADNAF.
13. Потенциал использования модельных и реальных значений действующих факторов окружающей среды в вопросах прогнозирования долговечности строительных материалов, изделий и конструкций / Т. А. Низина, Д. Р. Низин, В. П. Селяев [и др.] // Фундаментальные поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2022-2023 годы : Научные труды РААСН. В 2-х томах. – Москва : Издательство АСВ, 2024. – С. 315-324. – EDN GNVJUN.
14. «Расписание погоды» [Электронный ресурс]. – URL: <https://rp5.ru>.
15. Наставления гидрометеорологическим станциям и постам (выпуск 3, часть I. Метеорологические наблюдения на станциях, 1985; изменение №1, 1997).

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The author declare no conflicts of interests.

The article was submitted 01.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 691.327 : 666.973 :5 39.4

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.5. Строительные материалы и изделия

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_88

### ПОВЫШЕНИЕ СВЕТОПРОПУСКАЮЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ДЕЛИГНИФИЦИРОВАННОЙ ДРЕВЕСИНЫ ПРИ ПРОПИТКЕ РАСТИТЕЛЬНЫМ МАСЛОМ

© Авторы 2024  
SPIN: 6626-3274

**ПИЧУГИН Анатолий Петрович**

доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник  
Новосибирский государственный аграрный университет  
(Россия, Новосибирск, e-mail: gmunsau@mail.ru)

SPIN: 8480-2535

**ТКАЧЕНКО Сергей Евгеньевич**

аспирант  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Россия, Новосибирск)

SPIN: 2883-1204

**СМИРНОВА Ольга Евгеньевна**

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой  
Строительных материалов, стандартизации и сертификации  
Новосибирский государственный архитектурно-строительный  
университет (Сибстрин)  
(Россия, Новосибирск, e-mail: smirnova.olj@yandex.ru)

**Аннотация.** Внедрение светопропускаемой древесины позволяет эффективно утилизировать отходы деревообработки и открывает интересные направления в архитектурно-декоративном оформлении зданий при их строительстве и ремонте, а также в дизайнерских проектах. В статье рассмотрено влияние технологических факторов при обработке древесины на эксплуатационные характеристики делигнифицированного органического материала. Установлены закономерности проявления светопропускающей способности в зависимости от последовательности и параметров обработки древесных образцов. Приведены результаты спектральных исследований, которые дают представление о рациональности выбранных режимов обработки древесных образцов для обеспечения требуемой светопропускаемости.

**Ключевые слова:** светопропускание древесины; делигнификация древесины; адгезионные свойства; спектры поглощения; спектральные исследования; строительные материалы; древесина

**Для цитирования:** Пичугин А.П., Ткаченко С.Е., Смирнова О.Е. Повышение светопропускающей способности делигнифицированной древесины при пропитке растительным маслом // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 88-92. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_88.

Original article

### INCREASED LIGHT TRANSMISSION CAPACITY DELIGNIFIED WOOD WHEN IMPREGNATED WITH VEGETABLE OIL

© The Author(s) 2024

**PICHUGIN Anatoly Petrovich**

Doctor of Technical Sciences, Professor  
Novosibirsk State Agrarian University  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: gmunsau@mail.ru)

**TKACHENKO Sergey Evgenievich**

PhD Candidate  
Novosibirsk state University of architecture and civil engineering  
(Russia, Novosibirsk)



SMIRNOVA Olga Evgenievna

Candidate of Technical, Associate Professor

Novosibirsk state University of architecture and civil engineering

(Russia, Novosibirsk, e-mail: smirnova.olj@yandex.ru)

**Abstract.** The introduction of light-permeable wood makes it possible to effectively dispose of woodworking waste and opens up interesting directions in the architectural and decorative design of buildings during their construction and repair, as well as in design projects. The article considers the influence of technological factors in the processing of wood on the performance characteristics of a delignified organic material. The regularities of the manifestation of light transmission ability depending on the sequence and parameters of processing of wood samples have been established. The results of spectral studies are presented, which give an idea of the rationality of the selected processing modes of wood samples to ensure the required light transmission.

**Keywords:** light transmission of wood; delignification of wood; adhesive properties; absorption spectra; spectral studies; building materials; wood

**For citation:** Pichugin A.P., Tkachenko S.E., Smirnova O.E. Increased light transmission capacity delignified wood when impregnated with vegetable oil // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 88-92. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_88.

Повышение эффективности и привлекательности архитектурно-декоративных бетонов может быть достигнуто путем использования светопропускаемых заполнителей растительного происхождения из древесины малоценных пород – березы и осины. Учитывая эстетичность, экологичность и возобновляемость древесины, ее введение в технологический процесс производства композитов со светопропускаемыми свойствами, перспективы данного материала могут быть неограниченными. Известно, что пропитка делигнифицированного древесного материала эпоксидными смолами обеспечивает достаточно стабильное светопропускание, поэтому авторами была предпринята попытка повысить этот показатель у древесины, пропитанной растительным маслом со скипидаром [1-3].

Для достижения указанной задачи решались предварительно подготовленную древесину берёзы, обработанную различными химическими препаратами по ранее установленным режимам подвергали дополнительным воздействиям по рецептурно-технологическим параметрам (изменение процентного соотношения скипидара, воздействие тепловой обработки, изменение времени отдельных процессов). Степень светопропускания фиксировалась на специальной установке для проведения фотометрических исследований и оценки светопропускания обработанной древесины. Полученные результаты лабораторных испытаний легли в основу разработки технологической схемы производства архитектурно-декоративного арболита с фотометрическими свойствами [1-3].

Ранее авторами было показано, что в процессе инфильтрации делигнифицированной древесины бинарной композицией на основе подсолнечного или кукурузного масла и скипидара происходит проникновение данной композиции в клеточные

стенки древесины и структуру остаточного лигнина благодаря сульфатному скипидару, который способствует проявлению реакции конденсации (сшивания), в частности, с такими функциональными группами остаточного лигнина, как карбоксилы и гидроксилы, таким образом, понижая деформируемость и повышая термостойкость древесных образцов в целом. А за счет почти полной схожести показателей преломления бинарной композиции на основе скипидара (1,51) и целлюлозы (1,54), обеспечивается достаточно высокий первоначальный уровень светопропускаемости образцов древесины до 60-70% в сочетании с достаточно низким светопоглощением (оптической плотностью) – 8-15% [4; 10].

Важнейшим этапом получения инфильтрованных древесных образцов является – сушка. На этой стадии за счет медленного высыхания и испарения растительных масел, поглощения ими кислорода происходит уменьшение в объеме. При этом образуется тонкая жировая прозрачная пленка, способствующая стабилизации ее фотометрических свойств. Однако со временем данная пленка подвержена помутнению, что приводит через несколько лет к существенному снижению светопропускания. Выходом из создавшегося положения является эпоксидирование растительного масла, что может обеспечить более устойчивое состояние масляной пленки к светопропусканию во времени [4-8].

На первом этапе были определены некоторые технологические свойства растительных масел и пропиточных композиций (табл. 1).

Ранее авторами освещены вопросы промежуточных химических этапов и химической обработки древесины, с описанием всех этапов ее обработки и объемного расхода составляющих, а также разработанная технологическая схема получения древесины светопропускаемой в общем виде [2-5].



Таблица 1. Свойства растительных масел и пропиточных композиций

№ состава	Название	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Условная вязкость, $\mu$ , с	Сила поверхностного натяжения, F, Н
1	Подсолнечное масло	0,917-0,929	20,34-20,37	54,03-54,08
2	Кукурузное масло	0,914-0,918	19,89-19,92	54,02-54,09
3	Скипидар	0,852-0,871	9,63-9,66	28,01-28,05
4	Подсолнечное масло и скипидар	0,895-0,897	13,95-13,97	49,40-49,62
5	Кукурузное масло и скипидар	0,894-0,896	14,85-14,88	49,87-49,91

Одним из эффективных методов оценки состояния и структурного превращения в органических материалов является спектральный анализ, обеспечивающий подтверждение тех или иных отличительных особенностей вещества. Известно, что каждый химический элемент испускает и поглощает характерный только для него световой спектр. При прохождении ИК излучения через вещество, происходит его поглощение на частотах, совпадающих с некоторыми собственными колебательными и вращательными частотами молекул или частотами колебаний кристаллической решетки. В результате, интенсивность ИК излучения на этих частотах падает - образуются полосы поглощения. В соответствии с этим, возможно определение наличия этих веществ в том или ином материале по присущему только им спектру [9-11].

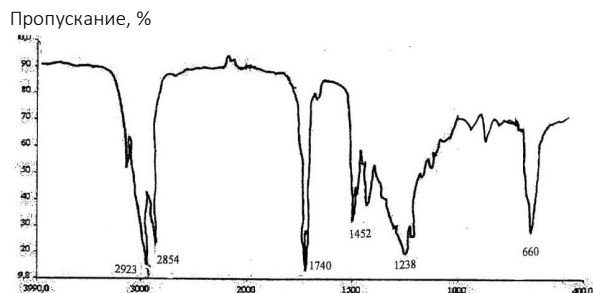


Рис. 1. ИК-спектр подсолнечного масла

На рис. 1 представлена спектрограмма подсолнечного масла с характерными полосами поглощения. Так, валентные колебания С-Н отмечены при 2923, 2854 см<sup>-1</sup>; валентные колебания С-О - 1740 см<sup>-1</sup>; деформационное колебание СН<sub>3</sub> - 1452 см<sup>-1</sup>; и валентное и деформационное колебание С-СО-С - 1238 см<sup>-1</sup>. Рассматривая спектрограмму скипидара (рис. 2), можно отметить валентные колебания С-Н в области 2800-2900 см<sup>-1</sup>; валентное и деформационное колебание С-СО-С при 1187-1205 см<sup>-1</sup>; интенсивные валентные и деформационные колебания СН=СН в области 700-1150 см<sup>-1</sup>.

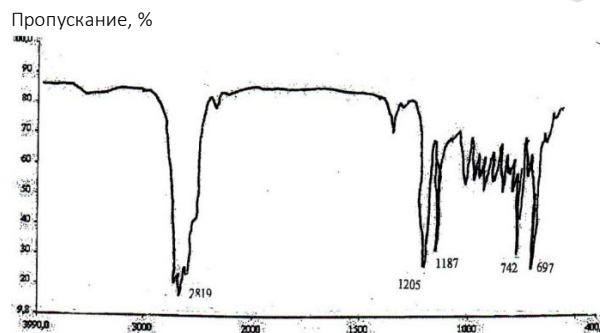


Рис. 2. ИК-спектр скипидара

При смешивании подсолнечного масла со скипидаром происходит реакция взаимодействия, приводящая к изменениям характера полос поглощения, однако в данных спектрах отчетливо видны сходства функциональных групп (рис. 3). Так, валентные колебания С-Н находятся практически в тех же областях (2920, 2815 см<sup>-1</sup>), что и у чистого подсолнечного масла; а валентные колебания С-О смещаются с 1740 см<sup>-1</sup> в зону 1580 см<sup>-1</sup>, что свидетельствует о взаимодействии компонентов и происходящих в данной системе реакциях. Деформационное колебание СН<sub>3</sub>, отмеченные при 1452 см<sup>-1</sup> смещаются в зону 1493 см<sup>-1</sup>; и валентное и деформационное колебание С-СО-С при 1238 см<sup>-1</sup> сдвигается в сторону меньших значений (1044 см<sup>-1</sup>).

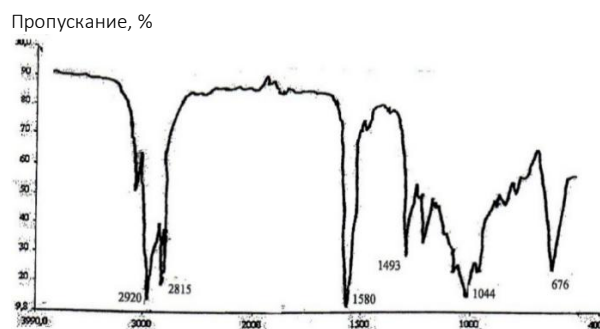


Рис. 3. ИК-спектр растительного масла со скипидаром

Как отмечалось ранее, при пропитке делигнифицированной древесины эпоксидной смолой отмечается длительная способность материала к пропусканию светового потока, поэтому было интересно выяснить, как повлияют технологические процессы на смесь растительного масла со скипидаром. Ранее авторами было установлено, что термопрогрев пропитанной делигнифицированной древесины разработанной композицией из растительного масла и скипидара позволяет достигнуть лучших результатов светопропускания, увеличивая этот показатель на 12-15% по сравнению с непрогретыми образцами. Прогрев пропитанной данной композицией древесины при температуре 75-85 °С в течение 25-35 минут способствует процессу эпоксидирования растительного масла.

Данный эффект был отнесен к образованию в смеси эпоксидных групп, что нашло подтверждение при ИК-спектральных исследованиях (рис. 4). Сравнение спектров подсолнечного и эпоксидированного подсолнечного масел показало, что полос, характерных для двойных связей в областях  $2923-2854 \text{ см}^{-1}$ ,  $1740 \text{ см}^{-1}$  на спектре эпоксидированного масла нет, зато появляется полоса поглощения в районе  $820-840 \text{ см}^{-1}$ , характерная для эпоксидных групп.

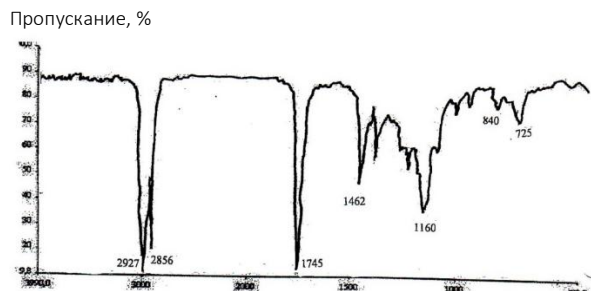


Рис. 4. ИК-спектр эпоксидированного растительного масла

Появление на спектрограмме полос при  $820-840 \text{ см}^{-1}$ , а при детальном увеличении спектрограммы отмеченное при  $823$  и  $841 \text{ см}^{-1}$ , свидетельствующие о деформационных колебаниях, непосредственно относящихся к появлению эпоксидных групп. Химический анализ проб позволил установить возрастание йодного числа до 47-62, а также появление эпоксидного числа в смеси от 14 до 18. При этом плотность композиции и светопропускание несколько возрастают, что свидетельствует о положительной роли пропитывающей композиции в улучшении свойств светопропускающей древесины.

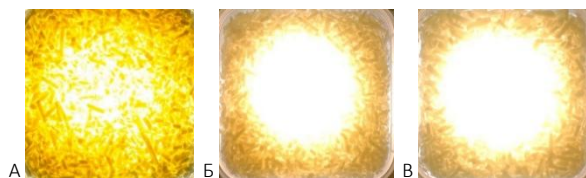


Рис. 5. Характер изменения светопропускания арболитовых образцов на делигнифицированной древесине берёзы при различных видах технологической обработки:

А – пропитка подсолнечным растительным маслом;  
Б – пропитка подсолнечным растительным маслом со скипидаром;  
В – то же, с термопрогревом в течение 30 минут при температуре  $75^\circ\text{C}$

Всё это приводит не только к повышению светопропускания, но и повышает адгезию древесного заполнителя к жидкостекольному вяжущему, изменяя характер отрыва с чисто адгезионного на адгезионно-когезионный. К положительным эффектам можно также отнести устойчивость к изменениям светопропускания во времени без снижения фотометрических свойств. На рис. 5 представлены образцы арболита со светопропускающим эффектом из древесины пропитанной композицией из раститель-

ного масла со скипидаром, а в таблице 2 приведены основные свойства нового материала.

Таблица 2. Свойства светопрозрачного арболита

Составы	Вид обработки древесного заполнителя	Светопропускание, %	Прочность при изгибе, $R_{изг}$ , МПа	Прочность при сжатии, $R_{сж}$ , МПа
1	Без обработки	0	1,4- 1,6	4,2- 4,6
2	Делигнифицирование	34-41	1,2- 1,3	3,4- 3,7
3	Пропитка растительным маслом со скипидаром	57-72	1,7- 1,8	4,9- 5,5
4	То же, с термопрогревом	75-85	1,9- 2,0	5,7- 5,9

Отмечено, что наивысшее значение предела прочности при изгибе и сжатии у составов с термопрогревом пропитанной древесины (состав № 4), что подтверждает ранее полученные результаты по увеличению адгезии и общему усилению композита.

Таким образом, можно сделать вывод, что прогрев пропитанной растительно-масляно-скипидарной композицией древесины позволяет обеспечить высокие прочностные свойства древесного композита за счет процесса эпоксидирования растительного масла при обеспечении повышенной светопропускающей способности в течение длительного срока эксплуатации.

#### Библиографический список

- Пичугин, А. П. Строительные материалы из растительного сырья / А. П. Пичугин, В. Ф. Хриланков, О. Е. Смирнова. – Новосибирск : ИЦ НГАУ "Золотой колос", 2020. – 207 с. – EDN CQZCCS.
- Прозрачный бетон – декоративный материал будущего. URL: <http://polymerstroyplus.ru/cement/prozrachnyj-cement.html> (дата обращения: 04.05.2020).
- Светопропускающий материал и способ его изготовления: пат. 2 604 040 Рос. Федерация: МПК E04C1/42 (2006.01) / И. В. Тимшин – № 2015131683/03; заявл. 29.07.15; опубл. 10.12.2016, Бюл. № 34.
- Ткаченко С.Е., Пичугин А.П. Изучение светопропускания строительных композитов для решения архитектурно-технологических задач / Инновационные научные исследования: сетевой журнал. 2021 № 3-1(5). С.36-40. URL: <https://ip-journal.ru/>
- Милославский А.Г. Эпоксидирование растительных масел пероксидом водорода в присутствии вольфрамата натрия и четвертичных аммониевых солей: дис. канд. тех. наук: 05.17.04: защищена 17.12.2008; утв. 22.05.2009 / Милославский Алексей Геннадьевич. – Казань, 2008. – 139 с.
- Эпоксидирование подсолнечного масла в системах на основе пероксида водорода и органических кислот / А. А. Сердюк, М. Г. Касянчук, И. А. Опейда [и др.] // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: "Хімія і хімічна технологія". – 2014. – № 1(22). – С. 205-210. – EDN SEDTVJ.
- Исследование эпоксидирования растительного масла / С. А. Бобровская, А. В. Ворошилова, А. Н. Шлейна,



А. В. Протопопов // News of Science and Education. – 2017. – Т. 8, № 2. – С. 055-058. – EDN ZEQHUN.

8. Ефимова А.И., Зайцев В.Б., Болдырев Н.Ю., Кашкаров П.К. Оптика: инфракрасная Фурье-спектрометрия. Учебное пособие для вузов. - Юрайт, 2018, 143 с.

9. Купцов, А. Х. Фурье-КР и Фурье-ИК спектры полимеров / А. Х. Купцов, Г. Н. Жижин. – Москва : Рекламно-издательский центр "Техносфера", 2013. – 696 с. – (Мир химии). – ISBN 978-5-94836-360-8. – EDN WDQQZJ.

10. Физико-химическая оценка влияния технологических факторов делигнификации на светопропускание древесины / А. П. Пичугин, Т. В. Ларина, О. Е. Смирнова, С. Е. Ткаченко // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 2(21). – С. 82-88. – DOI 10.51608/26867818\_2023\_2\_82. – EDN IIOWIA.

11. Астапенко В.А. Оптические информационные технологии. - МФТИ, 2015, 181 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 31.10.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 31.10.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 69

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

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

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_93

## МОДЕЛЬ БЕТОННОЙ СИСТЕМЫ С ВНУТРЕННЕЙ ГИДРОФОБНОЙ ФУНКЦИОНАЛИЗАЦИЕЙ И СУПЕРГИДРОФОБНЫМИ ПОКРЫТИЯМИ С ДОЛГОВРЕМЕННОЙ СТАБИЛЬНОСТЬЮ

© Авторы 2024  
SPIN: 8734-8947

**САДОВСКАЯ Елена Александровна**  
заведующая кафедрой «Инженерная графика строительного профиля»  
*Белорусский национальный технический университет*  
(Беларусь, Минск, e-mail: elena\_koleda@bk.ru)

SPIN: 2514-7976

**ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич**  
иностраннный академик РААСН, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Строительные материалы и технология строительства»  
*РААСН; Белорусский национальный технический университет*  
(Беларусь, Минск, e-mail: sleonovichsn@mail.ru)

SPIN: 1041-9513

**АНПИЛОВ Сергей Михайлович**  
Заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор кафедры ЖБК  
*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет*  
(Россия, Новосибирск, e-mail: anpilovsm@gmail.com)

SPIN: 8387-8220

**КИМ Лев Владимирович**  
кандидат технических наук, профессор, советник РААСН  
*Дальневосточный федеральный университет*  
(РФ, Владивосток, e-mail: kimlv2@yandex.ru)

**ШАЛЫЙ Евгений Евгеньевич**  
аспирант Инженерной школы  
*Дальневосточный федеральный университет*  
(РФ, Владивосток, e-mail: john\_shamali@mail.ru)

**ПИЧИ Чао**  
доктор, профессор  
*Университет Цинань*  
(КНР, Цинань, e-mail: mse-zhaoq@ujn.edu.ch)

**ДОНГ Бинг**  
доктор, доцент  
*Университет Цинань*  
(КНР, Цинань, e-mail: 022330104829@ujn.edu.ch)

**ЧЕН Лидиг**  
доктор, ассистент  
*Университет Цинань*  
(КНР, Цинань)

**Аннотация.** Цемент и бетон являются незаменимыми основными материалами для национального экономического строительства и социального развития, имеют широкое применение и будут и в будущем играть центральную роль в производстве строительных материалов. Однако кризис их долговечности становится все более заметным из-за присущих материалу характеристик и внешних экологических факторов, что создает серьезную проблему для устойчивого роста строительной отрасли. В частности, концепция "длительного срока службы здания" предложена специально для удовлетворения основных стратегических потребностей национальной безопасности и устойчивого развития. Она является актуальной для суровых условий эксплуатации (карбонизация, хлоридная агрессия, циклическое замораживание-оттаивание, увлажнение-высушивание), безопасной



эксплуатации и технического обслуживания, где к долговечности конструкционного бетона предъявляются повышенные требования. Исследование практических и эффективных технологий повышения долговечности является важной задачей, которую необходимо решить на данном этапе. Пористая структура бетона и метастабильные свойства продуктов гидратации являются причиной ухудшения его эксплуатационных характеристик на поздних стадиях. Под структурной рыхлостью понимается наличие в бетоне рыхлых переходных интерфейсов. Они состоят из слабых интерфейсов, вызванных избыточным накоплением воды на поверхности заполнителей и стальных стержней, а также возникающих дефектов интерфейса из-за значительной ориентации  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  и слабых сил межслойного связывания. Пористость – это образование пор в процессе приготовления, строительства и гидратации цементных материалов. На плотность микроструктуры бетона в первую очередь влияет неравномерное пространство, образующееся в результате потребления или испарения воды при затворении. Под метастабильностью понимаются явления растворения, карбонизации и трансформации, происходящие в продуктах гидратации цемента, которые могут привести к изменению объема бетона и в последствии повлиять на его долговечность. Суровые условия окружающей среды могут значительно повлиять на долговечность бетона, особенно в среде с высокой концентрацией коррозионных ионов, например, в морской среде, при замораживании и оттаивании, а также при циклическом увлажнении-высушивании в жарких и влажных условиях. Ещё создателями науки о коррозии бетона отмечалось, что "проницаемость или водонепроницаемость бетона - характеристика, напрямую связанная с долговечностью". Однако материалы на основе цемента по своей природе пористы и метастабильны. Это делает традиционные технические подходы, такие как уплотнение, сложными для долгосрочного ингибирования водно-солевого транспорта, что приводит к снижению долговечности. В последние годы применение технологии гидрофобной модификации для защиты от коррозии привлекло значительное внимание благодаря ее связи с теорией "эффекта листьев лотоса". Этот подход открывает новые перспективы для эффективного повышения долговечности цементного бетона.

**Ключевые слова:** бетонная система; внутренняя гидрофобная функционализация; супергидрофобное покрытие; долговременная стабильность; строительные материалы

**Для цитирования:** Модель бетонной системы с внутренней гидрофобной функционализацией и супергидрофобными покрытиями с долговременной стабильностью / Е.А.Садовская, С.Н. Леонович, С.М. Анпилов, Л.В. Ким, Е.Е. Шалый, Пичи Чао, Донг Бинг, Чен Лидиг // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 93-99. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_93.

Original article

## MODEL OF A CONCRETE SYSTEM WITH INTERNAL HYDROPHOBIC FUNCTIONALIZATION AND SUPERHYDROPHOBIC COATINGS WITH LONG-TERM STABILITY

© The Author(s) 2024

**SADOVSKAYA Elena Alexandrovna**

Head of the Department of Engineering Graphics of the Construction  
Belarusian National Technical University  
(Republic of Belarus, Minsk)

**ANPILOV Sergey Mikhailovich**

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof. *Novosibirsk State Architectural and Construction University*  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: [anpilovsm@gmail.com](mailto:anpilovsm@gmail.com))

**LEONOVICH Sergei Nikolaevich**

Doctor of Technical Sciences, Professor, foreign academician RAACS, Head of Building materials and Technology of Construction Department  
RAACS; *Belarusian National Technical University*  
(Republic of Belarus, Minsk)

**KIM Lev Vladimirovich**

Candidate of Technical Sciences, Professor  
*Far Eastern Federal University*  
(Russia, Vladivostok)

**SHALY Evgeniy Evgenievich**

PhD Candidate  
*Far Eastern Federal University*  
(Russia, Vladivostok)



**PIGI Chao**

Doctor, Professor  
Jinan University  
(China, Jinan)

**DONG Bing**

Doctor, Associate Professor  
Jinan University  
(China, Jinan)

**CHEN Liang**

Doctor, Assistant  
Jinan University  
(China, Jinan)

**Abstract.** Cement and concrete are indispensable basic materials for national economic construction and social development, have a wide application and will continue to play a central role in the production of building materials in the future. However, their durability crisis is becoming increasingly noticeable due to the inherent characteristics of the material and external environmental factors, which poses a serious challenge to the sustainable growth of the construction industry. In particular, the concept of “long-term building service life” is proposed specifically to meet the basic strategic needs of national security and sustainable development. It is relevant to severe operating conditions (carbonation, chloride aggression, freeze-thaw cycle, wet-dry), safe operation and maintenance, where increased requirements are placed on the durability of structural concrete. Researching practical and effective technologies to improve durability is an important task to be solved at this stage. The porous structure of concrete and the metastable properties of hydration products are the cause of deterioration of its performance characteristics at later stages. Structural looseness refers to the presence of loose transition interfaces in concrete. They consist of weak interfaces caused by excessive accumulation of water on the surface of aggregates and steel rods, as well as interface defects arising due to significant orientation of  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  and weak forces of interlayer bonding. Porosity is the formation of pores during the preparation, construction, and hydration of cementitious materials. The density of the microstructure of concrete is primarily affected by the uneven space formed as a result of the consumption or evaporation of water during mixing. Metastability refers to the phenomena of dissolution, carbonation, and transformation occurring in the hydration products of cement, which can cause changes in the volume of concrete and subsequently impact its durability. Harsh environmental conditions can significantly modify the durability of concrete, especially in environments with high concentrations of corrosive ions, such as marine environments, freeze-thaw cycles, and hot and humid wetting-drying cycles. It was noted by the founders of concrete corrosion science that “the permeability or impermeability of concrete is a characteristic directly related to durability.” However, cement-based materials are inherently porous and metastable. This makes traditional engineering approaches, such as compaction, difficult to inhibit water-salt transport over the long term, resulting in reduced durability. In recent years, the application of hydrophobic modification technology for corrosion protection has attracted considerable attention due to its relationship with the theory of “lotus leaf effect”. This approach opens up new prospects for effectively improving the durability of cement concrete.

**Keywords:** concrete system; internal hydrophobic functionalization; superhydrophobic coating; long-term stability; building materials

**For citation:** Model of a concrete system with internal hydrophobic functionalization and superhydrophobic coatings with long-term stability / E.A. Sadovskaya, S.N. Leonovich, S.M. Anpilov, L.V. Kim, E.E. Shaly, Pigi Chao, Dong Bing, Chen Lianig // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 93-99. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_93.

**Введение.** Область гидрофобной модификации материалов на основе цемента можно разделить на две категории по месту расположения: внутренняя гидрофобизация и поверхностная гидрофобизация [1-14]. Процесс внутренней гидрофобной модификации предполагает непосредственное включение гидрофобных компонентов, таких как жирные кислоты и кремний органические (кислородные) алканы, или гидрофобном одифицированных порошков, таких как глинистые минералы и зола-уноса, в процесс приготовления материалов на основе цемента. Преимущество такого подхода заключается в

создании более прочной трехмерной гидрофобной сети внутри материала, что приводит к повышению гидрофобной стабильности. Однако существенный недостаток этого метода заключается в том, что достижение гидрофобности цементных материалов часто требует значительного снижения их механических свойств в качестве компромисса [15-21]. Ванг и др. продемонстрировали, что включение ПДМС привело к увеличению угла поверхностного контакта раствора до  $157,3^\circ$ , эффективно повысив его проницаемость и коррозионную стойкость. Однако это привело к снижению прочности на сжатие на 30,9 %



и на изгиб на 18,1 %, соответственно. Срает выяснил, что гидрофобный силоксановый компонент препятствует раннему развитию структуры цемента, в основном из-за его вмешательства в процесс гидратации цементных минералов, тем самым препятствуя формированию четко определенной начальной сетевой структуры на ранних стадиях гидратации [22-33]. Для внутренней гидрофобной модификации материалов на основе цемента необходимо создать эффективную бетонную систему со стабильными продуктами гидратации, плотной микроструктурой и внутренней гидрофобной функцией. Для решения этой проблемы разработана гибридная гидрофобная эмульсия, содержащая микро-нано силоксан водорода (PMHS). Благодаря включению микронанокомпонентов, микропористая структура и гидрофобная сеть материалов на основе цемента может эффективно регулироваться, как показано на рис. 1. Конечной целью является значительное улучшение механических свойств и долговечности бетона за счет повышения его внутренней гидрофобности [34-40].

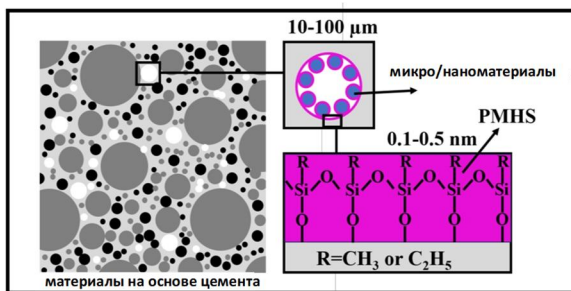


Рис. 1 - Механизм воздействия микро-нано-гибридной гидрофобной эмульсии PMHS на структуру микропор и гидрофобную сеть материалов на основе цемента

### 1. Способы повышения долговечности бетона

Повышение долговечности бетона может быть эффективно достигнуто за счет защитного покрытия поверхности, причем полимерцементные покрытия обладают высокими механическими свойствами, коррозионной стойкостью, устойчивостью к атмосферным воздействиям и экономичностью. Эти экологически чистые покрытия нашли широкое применение в различных защитных инженерных проектах. Однако традиционные покрытия на основе полимерного цемента по-прежнему не преодолели таких недостатков, как плохая гидрофобность и неэффективное блокирование коррозионных сред, таких как вода и соль, что значительно снижает их защитные характеристики. Силаны (силоксаны) изучаются для гидрофобной модификации благодаря их превосходному пленкообразованию и совместимости с материалами. Различные методы, включая нанесение поверхностного покрытия, пропитку, шаблонирование и самосборку, позволяют добиться хорошего супергидрофобного эффекта на бетонных поверхностях. Тем не менее, эти методы характеризуются нестабильностью, постоянным ухудше-

нием микронаношероховатости и адгезии интерфейса под воздействием различных факторов окружающей среды. Подготовлены супергидрофобные покрытия на основе цемента с использованием внутренне легированного силоксана (PDMS) с хорошей устойчивостью к обледенению и коррозии, но гидрофобные компоненты (PDMS) подавляли раннее структурное развитие цемента и снижали механические свойства.

### 2. Концепция дизайна капсул с контролируемым высвобождением ПДМС

Предложена концепция дизайна капсул с контролируемым высвобождением ПДМС для гидрофобной модификации покрытий. Предполагается, что регулирование временных рамок гидрофобной модификации в покрытиях может быть достигнуто за счет постепенного высвобождения ПДМС без изменения механизма реакции между гидрофильными группами полимера и цемента. Теоретическая база основана на эффекте шаблона Пикеринга, позволяющем формировать наноболочку с контролируемым проникновением на поверхность "основного материала". Несмотря на то, что эмульсия Пикеринга получила широкое распространение в биологии и медицине, ее применение в полимерно-цементных сложных системах остается неизученным. Основная проблема заключается в синхронизации гидрофобной модификации гидрофильных групп полимер-цемента с развитием структуры самого покрытия. Разработана гидрофобная эмульсия Пикеринга с замедленным высвобождением, пригодная для нанесения покрытий на основе полимерцемента. Кроме того, путем включения наполнителей и композитных добавок создается новая долговременная супергидрофобная защитная система на основе композиции эмульсии Пикеринга, цемента и полимера (рис. 2).

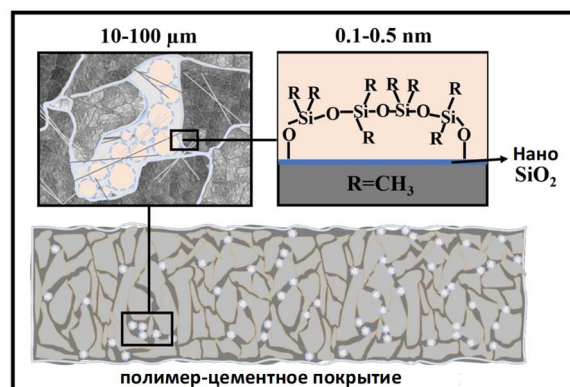


Рис. 2. Механизм действия эмульсии Пикеринга в системах покрытий на полимерно-цементной основе

### 3. Удовлетворение глобального общего спроса на «длительный срок службы зданий»

В связи с сокращением срока службы конструкционного бетона в морских условиях Китая и



некоторых производственных условиях Беларуси, большое значение имеет проведение исследований по повышению долговечности бетона. Исследования направлены на удовлетворение глобального общего спроса на "длительный срок службы зданий" в строительной отрасли. Руководствуясь комплексным развитием "конструкция-функция", ключевой целью является достижение долгосрочного ингибирования водно-солевой передачи в материалах на основе цемента. Это подразумевает разработку новых материалов, которые повышают долговечность инженерных конструкций из бетона, принимая во внимание технические ограничения, связанные с серьезным снижением прочности в результате гидрофобной модификации. Необходимо создание сопутствующей высокоэффективной системы защитных покрытий.

#### 4. Разработка микро-нано-гибридной гидрофобной эмульсии на основе ПМГС и ее влияние на механизм регулирования прочности бетона

Исследуется оптимальное приготовление гибридных гидрофобных эмульсий на основе микро-нано (метакаолин и нано-SiO<sub>2</sub>) силоксана водорода (PHMS). Фиксируется влияние дозировки эмульгатора, концентрации метакаолина и нано-SiO<sub>2</sub>, объемного соотношения масла и воды, скорости/времени перемешивания на морфологию и размер эмульсионных капель в гибридных гидрофобных эмульсиях. Стабильность гибридной гидрофобной эмульсии оценивается путем моделирования условий раствора цементных пор (pH и концентрация Ca<sup>2+</sup>). Выясняется механизм, по которому гибридные гидрофобные эмульсии создают гидрофобную микроструктуру на поверхности продуктов ранней гидратации. Кроме того, изучается как это синергетически регулирует микропористую структуру в сочетании с водоредуцирующими агентами и продуктами гидратации, тем самым влияя на механические свойства и микроструктуру бетона. Исследуется влияние гибридных гидрофобных эмульсий на долговечность бетона, а также на создание кинетических уравнений для диффузии Cl<sup>-</sup> в гидрофобно модифицированном бетоне и модели для оценки его долговечности.

**Заключение.** Разработана эмульсия Пикеринга с амфифильным нано-SiO<sub>2</sub> в качестве оболочечного слоя и ПДМС в качестве ядра. Изучается адсорбционное поведение его в полимер-цементе композитной системы и поведение высвобождения ПДМС. Выясняется влияние эмульсии Пикеринга на микроструктуру композита и создание целостной модели процесса эволюции микроструктуры "эмульсия Пикеринга - полимер-цемент"; эволюция трехмерной структуры пор покрытия (распределение

пор, связность и извилистость) и свойств (гидрофобные, механические, проницаемость и др.) во внешней среде (циклическое замораживание-оттаивание, циклическое увлажнение-высушивание, сульфатно-хлоридная эрозия и т.д.). Механизм регулирования долговечности покрытия выявляется путем целенаправленной настройки компонентов. Моделирование высокой концентрации хлористых солей для изучения процесса переноса Cl<sup>-</sup> в гидрофобно модифицированных материалах покрытия приводит к обоснованию подходящих методов для оценки срока службы покрытий.

#### Библиографический список

1. Y. Yi, D. Zhu, S. Guo, Z. Zhang, C. Shi, Обзор ухудшения и подходов к повышению долговечности бетона в морской среде, *Cem. Concr. Compos.* 113 (2020) 103695. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103695>.
2. H. Justnes, M.O. Kim, S. Ng, X. Qian, Методика расчета требуемого коэффициента диффузии хлоридов для предполагаемого срока службы как функции бетонного покрытия в армированных морских конструкциях, *Cem. Concr. Compos.* 73 (2016) 316-323. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2016.08.006>.
3. P. Zhang, F.H. Wittmann, M. Vogel, H.S. Müller, T. Zhao, Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete, *Cem. Concr. Res.* 100 (2017) 60-67. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.05.018>.
4. W. She, J. Yang, J. Hong, D. Sun, S. Mu, C. Miao, Супергидрофобный бетон с повышенной механической прочностью: Наногибридные композиты, механизм укрепления и оценка долговечности, *Constr. Build. Mater.* 247 (2020) 118563. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118563>.
5. J. Yang, W. Zuo, S. Wei, Towards a further understanding of cement hydration at the early-age stage in presence of hydrophobic silane IBTEO, *Cem. Concr. Compos.* 153 (2024) 105712. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2024.105712>.
6. Y. Pang, H. Wang, Q. Tang, L. Yang, Q. Wang, Повышение гидрофобности цементного раствора против сульфатного воздействия сухого мокрого цикла с использованием порошка слюды, модифицированного стеариновой кислотой, путем высокотемпературного перемешивания, *Constr. Build. Mater.* 441 (2024) 137556. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137556>.
7. Y. Chen, R. Wang, H. Wang, F. Hu, P. Jin, Study on PVA-siloxane mixed emulsion coats for hydrophobic cement mortar, *Prog. Org. Coat.* 147 (2020) 105775. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2020.105775>.
8. M.S. Hossain, V. Panov, S. Choi, J.B. Kim, K.K. Yun, Характеристики долговечности цементного раствора с добавлением водоотталкивающих примесей, *Constr. Build. Mater.* 440 (2024) 137262. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.137262>.
9. W. She, X. Wang, C. Miao, Q. Zhang, Y. Zhang, J. Yang, J. Hong, Biomimetic superhydrophobic surface of concrete: Topographic and chemical modification assembly by direct spray, *Constr. Build. Mater.* 181 (2018) 347-357. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.063>.



10. R. Li, P. Hou, N. Xie, Z. Ye, X. Cheng, S.P. Shah, Design of SiO<sub>2</sub>/PMHS hybrid nanocomposite for surface treatment of cement-based materials, *Cem. Concr. Compos.* 87 (2018) 89-97. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.12.008>.
11. P. Liu, Y. Gao, F. Wang, J. Yang, X. Yu, W. Zhang, L. Yang, Superhydrophobic and self-cleaning behavior of Portland cement with lotus-leaf-like microstructure, *J Clean Prod.* 156 (2017) 775-785. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.211>.
12. И. Флорес-Вивиан, В. Хеджази, М.И. Кожухова, М. Носоновский, К. Соболев, Самособирающиеся частицы-силоксановые покрытия для супергидрофобного бетона, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 5 (2013) 13284-13294. <https://doi.org/10.1021/am404272v>.
13. C. Li, Y. Sun, M. Cheng, S. Sun, S. Hu, Fabrication and characterization of the TiO<sub>2</sub>/polysiloxane resin composite coating with full-thickness super-hydrophobicity, *Chem. Eng. J.* 333 (2018) 361-369. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.09.165>.
14. И. Торун, М. Рузи, Ф. Эр, М.С. Онсес Супергидрофобные покрытия из биосовместимого полидиметилсилоксана и натурального воска, *Prog. Org. Coat.* 136 (2019) 105279. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2019.105279>.
15. F. Wang, T. Xie, S. Lei, J. Ou, W. Li, M. Xue, D. Huang, Preparation and properties of foundry dust/Portland cement based composites and superhydrophobic coatings, *Constr. Build. Mater.* 246 (2020) 118466. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118466>.
16. L. Guo, S. Huang, L. Zhang, P. Jia, The interface crack problem for a functionally graded coating-substrate structure with general coating properties, *Int. J. Solids Struct.* 146 (2018) 136-153. <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2018.03.025>.
17. D.A. Kagi, K.B. Ren, Снижение водопоглощения в бетоне, обработанном силикатами, путем последующей обработки катионными поверхностно-активными веществами, *Build. Environ.* 30 (1995) 237-243. [https://doi.org/10.1016/0360-1323\(94\)00047-v](https://doi.org/10.1016/0360-1323(94)00047-v).
18. Y. Zhu, S. Kou, C. Poon, J. Dai, Q. Li, Influence of silane-based water repellent on durability properties of recycled aggregate concrete, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008>.
19. F. Tittarelli, G. Moriconi, Сравнение между поверхностной и объемной гидрофобной обработкой против коррозии оцинкованной арматуры в бетоне, *Cem. Concr. Res.* 41 (2011) 609-614. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.011>.
20. L. Lei, Q. Wang, S. Xu, N. Wang, X. Zheng, Изготовление супергидрофобного бетона, используемого в морской среде, с антикоррозионными и стабильными механическими свойствами, *Constr. Build. Mater.* 251 (2020) 118946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118946>.
21. J. Cayette, B. Delsaute, N. Milenković, J. Lecomte, M. Delplancke, S. Staquet, Расширенная характеристика поведения сыпучих гидрофобных растворов в раннем возрасте, *Constr. Build. Mater.* 267 (2021) 120904. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120904>.
22. R. Kalpokaitė-Dičkuvienė, S.I. Lukošiušis, A. Baltušnikas, J. Čėsniene, Structural observation of cement paste modified with hydrophobic organoclay, *Constr. Build. Mater.* 272 (2021) 121931. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121931>.
23. P. Chindaprasirt, U. Rattanasak, Изготовление самоочищающегося материала из золы/политетрафторэтилена для распыления цементного раствора, *JCleanProd.* 264 (2020) 121748. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121748>.
24. F. Wang, S. Lei, J. Ou, W. Li, Влияние PDMS на гидроизоляционные характеристики и коррозионную стойкость цементного раствора, *Appl. Surf. Sci.* 507 (2020) 145016. <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2019.145016>.
25. S. Muzenski, I. Flores-Vivian, K. Sobolev, Durability of superhydrophobic engineered cementitious composites, *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 291-297. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.014>.
26. S. Muzenski, I. Flores-Vivian, K. Sobolev, Hydrophobic modification of ultra-high-performance fiber-reinforced composites with matrices enhanced by aluminum oxide nano-fibers, *Constr. Build. Mater.* 244 (2020) 118354. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118354>.
27. Z. Feng, F. Wang, T. Xie, J. Ou, M. Xue, W. Li, Интегральный гидрофобный бетон без использования силана, *Constr. Build. Mater.* 227 (2019) 116678. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.116678>.
28. B. Dong, F. Wang, H. Abadikhah, L. Hao, X. Xu, S.A. Khan, G. Wang, S. Agathopoulos, Simple Fabrication of Concrete with Remarkable Self-Cleaning Ability, Robust Superhydrophobicity, Tailored Porosity, and Highly Thermal and Sound Insulation, *ACS Appl. Mater. Interfaces.* 11 (2019) 42801-42807. <https://doi.org/10.1021/acsami.9b14929>.
29. W. Wang, S. Wang, D. Yao, X. Wang, X. Yu, Y. Zhang, Fabrication of all-dimensional superhydrophobic mortar with enhanced waterproof ability and freeze-thaw resistance, *Constr. Build. Mater.* 238 (2020) 117626. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117626>.
30. J. Song, D. Zhao, Z. Han, W. Xu, Y. Lu, X. Liu, B. Liu, C.J. Carmalt, X. Deng, I.P. Parkin, Super-robust superhydrophobic concrete, *J. Mater. Chem. A.* 5 (2017) 14542-14550. <https://doi.org/10.1039/c7ta03526h>.
31. X.M. Kong, H. Liu, Z.B. Lu, D.M. Wang, The influence of silanes on hydration and strength development of cementitious systems, *Cem. Concr. Res.* 67 (2015) 168-178. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.10.008>.
32. Y. Zhang, L. Chen, Z. Liu, W. Li, S. Hong, G. Zhu, B. Dong, Производство интегрального гидрофобного бетона (ИНС) с использованием эмульсии Пикеринга с ограниченным влиянием на механическую прочность, *Constr. Build. Mater.* 312 (2021) 125319. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125319>.
33. S. Muzenski, I. Flores-Vivian, K. Sobolev, Hydrophobic engineered cementitious composites for road applications, *Cem. Concr. Compos.* 57 (2015) 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.12.009>.
34. J. Zhang, B. Mei, Y. Zhang, G. Pan, Y. Zhang, H. Qiao, M. Shang, L. Yang, X. Xie, S. Zhai, Hierarchical bio-inspired design and fabrication of all-dimensional superhydrophobic ultra-lightweight high-volume fly ash cement foams using novel ultrasonic-assisted siloxane-encapsulated pickering emulsions, *Compos. Part B-Eng.* 282 (2024) 111581. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111581>.
35. D.P. Bentz, A.S. Hansen, J.M. Guynn, Оптимизация размеров частиц цемента и летучей золы для получения



устойчивых бетонов, *Cem. Concr. Compos.* 33 (2011) 824-831. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.04.008>.

36. J. Lapeyre, A. Kumar, Влияние пуццолановых добавок на механизмы гидратации трикальций силиката, *J. Am. Ceram. Soc.* 101 (2018) 3557-3574. <https://doi.org/10.1111/jace.15518>.

37. P. Hou, S.H. Kawashima, K. Wang, D.J. Corr, J. Qian, S.P. Shah, Effects of colloidal nanosilica on rheological and mechanical properties of fly ash-cement mortar, *Cem. Concr. Compos.* 35 (2013) 12-22. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.027>.

38. A. Ramezaniapour, M. Mortezaei, S. Mirvalad, Synergic effect of nano-silica and natural pozzolans on

transport and mechanical properties of blended cement mortars, *Journal of Building Engineering.* 44 (2021) 102677. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102667>.

39. J. Yang, W. She, W. Zuo, K. Iyu, Q. Zhang, Рациональное применение нано-SiO<sub>2</sub> в цементных пастах с добавлением силана: уравнивающие и синергетические эффекты, *Cem. Concr. Compos.* 118 (2021) 103959. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.103959>.

40. F. Muhammad, P. Hou, Z. Wang, X. Zhou, X. Cheng, The counterbalance of the adverse side effects of releasing agent on properties of cementitious materials with nano-particles, *Cem. Concr. Compos.* 125 (2022) 104300. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104300>.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 07.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 07.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья  
УДК 691-492  
ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура  
ВАК: 2.1.5. Строительные материалы  
doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_100

## ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ДИСПЕРСНЫХ МИКРОКРЕМНЕЗЕМОВ

© Авторы 2024  
SPIN: 4845- 3197

**СЕЛЯЕВ Владимир Павлович**  
академик РААСН, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой «Строительные конструкции»  
РААСН; Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва  
(Россия, Саранск, e-mail: ntorm80@mail.ru)

SPIN: 7431- 8742

**КУПРИЯШКИНА Людмила Ивановна**  
кандидат технических наук, доцент  
Национальный исследовательский Мордовский государственный  
университет им. Н.П. Огарёва  
(Россия, Саранск)

**Аннотация.** В данной статье приведены экспериментальные данные исследования тонкой структуры дисперсных микрокремнеземов: топографии поверхности, морфологии их частиц. Для этого использовался многофункциональный растровый электронный микроскоп Quanta 200 i3DFEI, позволяющий просматривать детали строения пористых ассоциатов микрометровых размеров, а также частиц нанометрового уровня. Детальный анализ полученных микрофотографий позволяет проследить структуру иерархической организации частиц аморфного диоксида кремния и конденсированного микрокремнезема. Для более точного определения элементного состава дисперсных микрокремнеземов применялся рентгенофлуоресцентный спектрометр ARLPerform`X 4200, который позволяет получать информацию об элементном составе значительного объема исследуемого объекта.

**Ключевые слова:** микрокремнезем; структура; аморфный диоксид кремния; вакуумная панель; теплоизоляция; порошкообразная система; рентгенофлуоресцентный анализ; наполнитель

**Для цитирования:** Селяев В.П., Куприяшкина Л.И. Исследование структуры дисперсных микрокремнеземов // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 100-104. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_100.

Original article

## STUDY OF THE STRUCTURE OF DISPERSED MICROSILICA

© The Author(s) 2024

**SELYAEV Vladimir Pavlovich**  
Academician of RAACS, Honored Worker of Science of the Russian Federation,  
Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Building Structures  
RAACS, Mordovian State University named after N. P. Ogarev  
(Russia, Saransk, e-mail: ntorm80@mail.ru)

**KUPRIYASHKINA Lyudmila Ivanovna**  
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor  
Mordovian State University named after N. P. Ogarev  
(Russia, Saransk)

**Abstract.** This article presents experimental data on the study of the fine structure of dispersed microsiliicas: surface topography, morphology of their particles. For this purpose, a multifunctional scanning electron microscope Quanta 200 i3DFEI was used, which allows viewing the details of the structure of porous associates of micrometer sizes, as well as nanometer-level particles. A detailed analysis of the obtained microphotographs allows tracing the structure of the hierarchical organization of particles of amorphous silicon dioxide and condensed microsiliica. For a more accurate determination of the elemental composition of



dispersed microsiliicas, an ARLPerform<sup>®</sup>X 4200 X-ray fluorescence spectrometer was used, which allows obtaining information on the elemental composition of a significant volume of the object under study.

**Keywords:** microsilica; structure; amorphous silicon dioxide; vacuum panel; thermal insulation; powder system; X-ray fluorescence analysis; filler

**For citation:** Selyaev V.P., Kupriyashkina L.I. Study of the structure of dispersed microsilica // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 100-104. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_100.

Синтез порошков аморфного микрокремнезема является актуальной задачей, так как они отличаются повышенной реакционной активностью. Материалы, полученные из этих порошков имеют повышенные физико-механические, теплофизические свойства, коррозионную стойкость. Наиболее дешевым и доступным способом является получение кремнезема из природных кремнесодержащих пород [1-3]. Большой интерес в этом плане представляет диатомит, модификация которого позволяет получить многофункциональный и поликомпонентный наполнитель, который можно использовать при изготовлении вакуумных теплоизоляционных панелей VIP [4-7]. В данной статье были рассмотрены аморфный диоксид кремния, полученный из диатомита Атемарского месторождения [8-10] и конденсированный микрокремнезем (ТУ 5743 048 – 02295332 – 96).

Для исследования тонкой структуры дисперсных микрокремнеземов, топографии поверхности, морфологии их частиц использовался много-функциональный растровый электронный микроскоп Quanta 200 i3DFEI. Ускоряющее напряжение, при котором получены микрофотографии составляло 20 кВ. Значения увеличений прибора варьировались от 800 до 2 4000  $\times$ . Данная модель электронного микроскопа позволяет получать микрофотографии и при большем увеличении, однако исследуемый материал представляет собой диэлектрик, поэтому в процессе измерений образец, находящийся в электрическом поле, электризуется, что приводит к потере четкости изображения [11].

На рис. 1 представлены микрофотографии дисперсного порошка аморфного диоксида кремния (образец № 1) при увеличениях 3 000, 6 000, 12 000 и 24 000  $\times$ .

Детальный анализ полученных микрофотографий позволяет проследить структуру иерархической организации частиц дисперсного кремнезема. Так, поверхность крупных частиц, размеры которых  $\sim 100$  мкм имеют сложный рельеф. Отчетливо просматривается система поровых углублений диаметров от нескольких, до десяти микрометров (рис. 1а). Большая часть поверхности таких частиц покрыта рыхлыми агломератами, линейные размеры которых  $\sim 3$ –15 мкм, что согласуется с приведенными ранее данными гранулометрических измерений. При увеличении 6000 $\times$  уверенно идентифицируются ча-

стицы субмикрометровых размеров, а также многочисленные поры диаметром менее 1 мкм. На микрофотографии при 12 000-кратном увеличении просматриваются детали строения пористых ассоциатов микрометровых размеров, а также частиц нанометрового уровня. Поры и оврагообразные трещины покрывают практически всю поверхность исследуемой частицы. Наиболее мелкие агрегаты первичных частиц микрокремнезема, имеющие размеры  $\sim 250$  нм, а также поры диаметром 200–300 нм можно обнаружить на рис. 1з при увеличении 24000 $\times$ .

Многофункциональный электронный микроскоп Quanta 200 позволяет проводить локальный анализ элементного состава образца. Результаты исследований представляются в виде спектра рентгенофлуоресценции различных компонентов материала, а также таблицы, в которой приводится процентное содержание обнаруженных элементов и оксидов. На рис. 2 представлены результаты исследования элементного состава аморфного диоксида кремния (образец № 1).

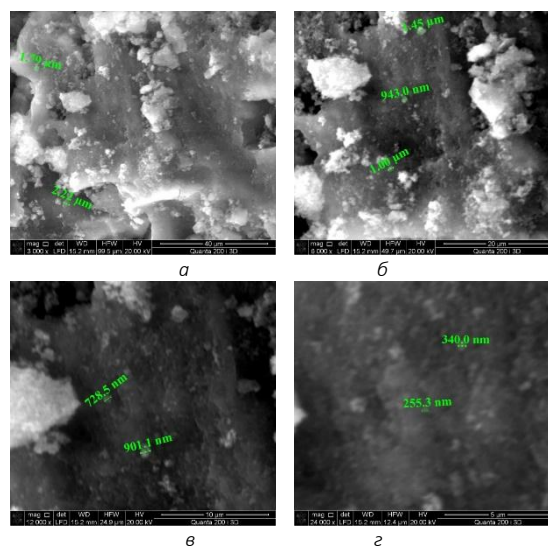


Рис. 1. Микрофотографии аморфного диоксида кремния при увеличениях:

а – 3 000 $\times$ ; б – 6 000  $\times$ ; в – 12 000  $\times$ ; з – 24 000  $\times$

Как и следовало ожидать, в локальной области образца № 1, показанной на рис. 1, больше всего содержится диоксида кремния – около 95% по массе, а оксиды других элементов составляют менее 5%. Основываясь на данных таблицы (рис. 2), делаем вывод, что в исследуемом микрокремнеземе



наиболее представлены следующие оксиды:  $Al_2O_3$  – 1,73%;  $Fe_2O_3$  – 0,66 % ;  $K_2O$  – 0,50 % и  $TiO_2$  – 0,36 %. Отметим незначительное содержание таких соединений, как  $N_2O$  – 0,25 % ;  $MgO$  – 0,24 % и  $MnO$  – 0,22 %.

Сопоставляя полученные данные элементного состава большого объема дисперсного образца и его локальной области, можно сделать вывод о том, что распределение примесей – оксидов метал-

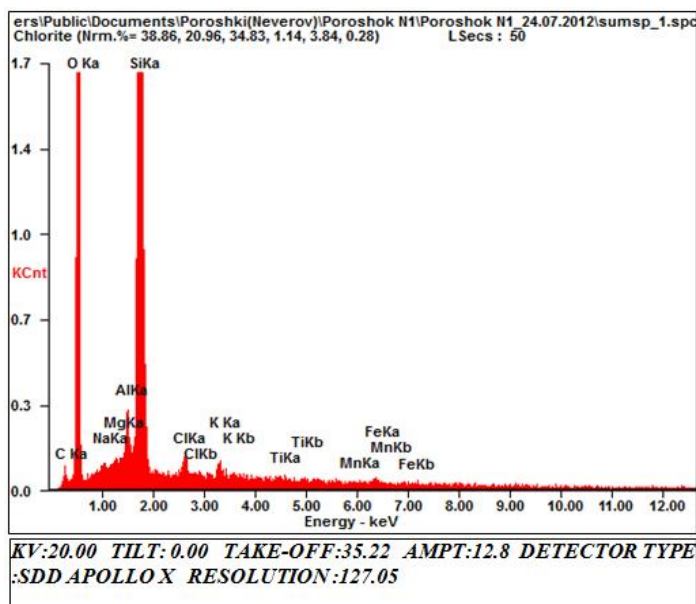


Рис. 2. Результаты локального элементного анализа аморфного диоксида кремния

Для более точного определения элементного состава дисперсных микрокремнеземов применялся рентгенофлуоресцентный спектрометр ARLPerform`X 4200. Данный прибор, в отличие от спектрометра многофункционального электронного микроскопа, позволяет получать информацию об элементном составе значительного объема исследуемого объекта. Это достигается за счет выбора площади пятна первичного рентгеновского пучка, падающего на образец, которая может достигать 10 см<sup>2</sup>. При исследовании микрокремнеземов – образцы № 1–2 – площадь пятна ограничивалась величиной 5 см<sup>2</sup>, что обусловлено конструктивными особенностями держателя порошкообразных систем. Кроме того, ускоряющее напряжение, подаваемое на Rh-анод рентгеновской трубки значительно больше, чем в спектрометре электронного микроскопа, и составляет 60–70 кВ. При этом энергия рентгеновских фотонов достаточно велика для того, чтобы возбудить атомы исследуемого вещества на глубине до нескольких сотен микрометров (в зависимости от его коэффициента поглощения). Результаты рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава аморфного диоксида кремния (образец №1) представлены ниже :

$SiO_2$  – 97,82 % ;  $K_2O$  – 0,50 % ;  $Al_2O_3$  – 0,46 % ;  $TiO_2$  – 0,31 % ;

$Fe_2O_3$  – 0,16 % ;  $CaO$  – 0,03 % ;  $Cl$  – 0,69 % ;  $P$  – 0,01 %.

лов – в микрокремнеземе, полученном из диатомита Атемарского месторождения, неравномерно. Оказалось, что в изученной локальной области микрометровых размеров содержание оксида алюминия в четыре раза превышает среднее значение его массовой концентрации в макрообъеме образца. Аналогичное соотношение – 4 : 1 – наблюдается и для оксида железа. Наличие хлора в образце № 1, по-видимому, связано со способом получения рассматриваемого микрокремнезема, так как при его выщелачивании применялся разбавленный раствор соляной кислоты [12–14].

Микрофотографии конденсированного микрокремнезема (образец № 2) приведены на рис. 3. Они дают представление о поверхности частиц этого дисперсного материала. Частицы имеют рыхлую поверхность, которая пронизывается порами микро- и нанометровых размеров. Во всем поле зрения электронного микроскопа при различных увеличениях можно обнаружить агломераты первичных частиц, составляющих данный микрокремнезем, в виде диффузных сфероподобных объектов, либо напоминающие кучевые облака причудливой формы, образования. При минимальном увеличении прибора просматривается складчатый характер строения макрочастиц кремнезема.

Ниже приводятся результаты элементного анализа конденсированного микрокремнезема (образец № 2). Согласно ТУ 5743 048 – 02295332 – 96,



этот мелкодисперсный порошок представляет собой сложную смесь оксидов, основным компонентом которой является диоксид кремния. При этом содержание  $\text{SiO}_2$  – не менее 85%; массовая доля свободных щелочей ( $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ ) – не более 2 %; массовая доля оксида кальция ( $\text{CaO}$ ) – не более 3 %; массовая доля серного ангидрида ( $\text{SO}_3$ ) – не более 0,6 %.

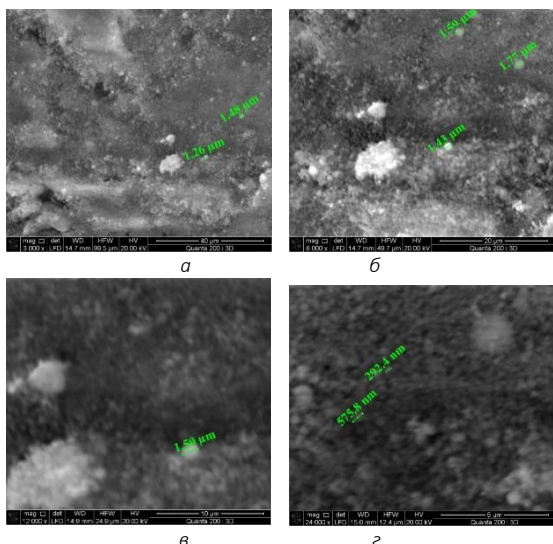


Рис. 3. Микрофотографии конденсированного микрокремнезема:  
а – 3 000 х; б – 6 000 х; в – 12 000 х; г – 24 000 х

Результаты рентгенофлуоресцентного анализа элементного состава образца № 2 следующие:  
 $\text{SiO}_2$  – 90,42 %;  $\text{K}_2\text{O}$  – 2,50 %;  $\text{MgO}$  – 1,84 %;  
 $\text{Fe}_2\text{O}_3$  – 1,71 %;  
 $\text{Na}_2\text{O}$  – 0,89 %;  $\text{SO}_3$  – 0,67 %;  $\text{Al}_2\text{O}_3$  – 0,61 %;  $\text{CaO}$  – 0,56 %;  
 $\text{P}_2\text{O}_5$  – 0,32 %;  $\text{MnO}$  – 0,26 %.

В целом, данные элементного состава конденсированного кремнезема позволяют сделать вывод о сложном составе этого дисперсного материала. Кроме указанных в ТУ соединений обнаружены оксиды ряда металлов:  $\text{MgO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$  и  $\text{MnO}$ . Таким образом, использование рентгенофлуоресцентного спектрометра позволяет получить исчерпывающую информацию об элементном составе минеральных порошков и дисперсных систем на их основе. Данный метод исследования и контроля состава вещества необходим при производстве различного рода строительных материалов, сухих смесей, теплоизоляционных наполнителей и т.д. Рентгенофлуоресцентный спектр локального объема конденсированного микрокремнезема и таблица его элементного состава показаны на рис. 4.

Как и в случае образца аморфного диоксида кремния (образец № 1) в образце № 2 (конденсированный микрокремнезем) наблюдаются локальные флуктуации массовых долей оксидов некоторых металлов, что, по всей видимости, является следствием малой концентрации примесей, содержащихся в исследуемом материале. Кроме того, высокая точность измерений, достигаемая при использовании рентгенофлуоресцентных спектрометров, позволяет регистрировать весьма малые (сотые доли процента) изменения этих концентраций.

#### Выводы

Исходя из функциональных требований VIP, наполнитель должен обеспечивать стабильные теплозащитные свойства панелей на весь нормативный или расчетный срок эксплуатации. Для этого, наполнитель должен иметь следующие характеристики: пористость в состоянии свободной засыпки выше 92 %; крупность частиц меньше 0,2 мм с высокой степенью однородности; координационное число в пре-

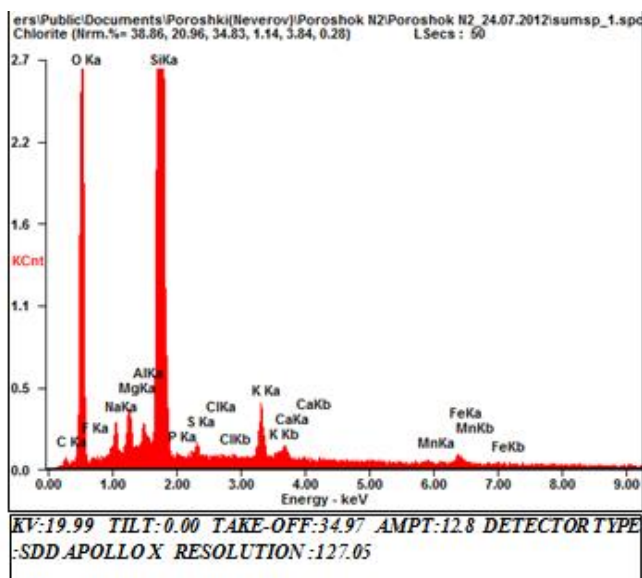


Рис. 4. Результаты локального элементного анализа конденсированного микрокремнезема

Element	Wt %	Mol %
F2O	00.33	00.37
Na2O	01.31	01.29
MgO	01.76	02.67
Al2O3	01.12	00.67
SiO2	90.08	91.50
P2O5	00.19	00.08
SO3	00.85	00.64
Cl2O	00.05	00.03
K2O	01.93	01.25
CaO	00.56	00.61
MnO	00.40	00.34
Fe2O3	01.44	00.55

EDAX ZAF QUANTIFICATION STANDARDLE  
TABLE: USER



делах  $2 \div 4$ , фрактальная размерность неоднородностей поверхности зерен наполнителя – в пределах  $2,4 - 2,7$ ; элементный состав более чем на 90 % должен состоять из оксидов кремния [15]. На основании выше изложенного анализа структуры дисперсных порошков аморфный диоксид кремния, полученный из диатомита Атемарского месторождения, можно использовать как наполнитель при изготовлении вакуумных теплоизоляционных панелей.

### Библиографический список

1. Schaefer D. W. Von evakuirten Dämmungen bei Passivhäusern / D. W. Schaefer, R. S. Justice // *Macromolecules*, 2007. – Vol. 40, № 24. P. 8501–8517.

2. Структурные, спектроскопические и теплофизические исследования природных диатомитов некоторых месторождений Республики Казахстан / В. П. Селяев, Р. Е. Нурлыбаев, Б. Ф. Мамин [и др.] // *Региональная архитектура и строительство*. – 2015. – № 1(22). – С. 5-10. – EDN TNDXPL.

3. Синтез нанопорошков аморфного диоксида кремния для строительной отрасли / В. П. Селяев, В. А. Неверов, Р. Е. Нурлыбаев [и др.] // *Строительные материалы*. – 2019. – № 11. – С. 15-25. – DOI 10.31659/0585-430X-2019-776-11-15-25. – EDN WNUNES.

4. Синтез диоксида кремния из опалкристаллитовых аморфных пород. Свойства. Область применения / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, А. А. Седова, О. В. Лияскин // *Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности*. – 2021. – № 2(392). – С. 154-159. – DOI 10.47367/0021-3497\_2021\_2\_154. – EDN ABSXNB.

5. Камашев Д. В. Влияние условий синтеза аморфного кремнезема на морфологию частиц // *Материалы III Международного минералогического семинара «Новые идеи и концепции в минералогии»*. / Д. В. Камашев. – Сыктывкар: Геопринт, 2002. – С. 185 – 186.

6. Оптимизация технологических режимов синтеза диоксида кремния с размером частиц в нанометровом диапазоне / В. П. Селяев, Р. Е. Нурлыбаев, И. Б. Сангулова [и др.] // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2019. – № 4. – С. 102-110. – DOI 10.25686/2542-114X.2019.4.102. – EDN GSWZDU.

7. Влияние температуры прокаливания природного диатомита на качество синтезированного кремнезема / Л. И. Куприяшкина, А. К. Осипов, О. Н. Савинова [и др.] // *Огарёв-Online*. – 2017. – № 16(105). – С. 6. – EDN YSTMCF.

8. Способы получения микрокремнезема из диатомита Атемарского месторождения республики Мордовия / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, М. А. Муханов, О. В. Лияскин // *Расширение применения местных сырьевых материалов и отходов предприятий Республики Мордовия при изготовлении строительных материалов и изделий: Мате-*

*риалы Международной научно-технической конференции, Саранск, 18–19 ноября 2022 года / Отв. редактор В.Т. Ерофеев [и др.]*. – Саранск: Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва, 2023. – С. 345-350. – EDN VVXGXJ.

9. Способы получения микрокремнезема из диатомита Атемарского месторождения Республики Мордовия / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, М. А. Муханов, О. В. Лияскин // *Эксперт: теория и практика*. – 2023. – № 1(20). – С. 125-129. – DOI 10.51608/26867818\_2023\_1\_125. – EDN TEDXFV.

10. Свойства и опыт применения диоксида кремния, синтезированного из диатомита / В. П. Селяев, А. К. Осипов, П. В. Селяев [и др.] // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2020. – № 2. – С. 7-19. – DOI 10.25686/2542-114X.2020.2.7. – EDN GZBEST.

11. Микроанализ и растровая электронная микроскопия / под ред. Ф. Мо-рис, Л. Мени, Р. М. Тиксье. – М.: Металлургия, 1985. – 392 с

12. Патент № 2625114 С Российская Федерация, МПК C01B 33/18, C01B 33/193. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема золь-гель методом : № 2016115956 : заявл. 22.04.2016 : опубл. 11.07.2017 / В. П. Селяев, А. А. Седова, Л. И. Куприяшкина [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва". – EDN JVSXNV.

13. Патент № 2526454 C1 Российская Федерация, МПК C01B 33/18, C09C 1/28. Способ получения тонкодисперсного аморфного микрокремнезема : № 2013104054/05 : заявл. 30.01.2013 : опубл. 20.08.2014 / В. П. Селяев, А. К. Осипов, А. А. Седова, Л. И. Куприяшкина ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва". – EDN URXBVN.

14. Патент № 2740995 C1 Российская Федерация, МПК C01B 33/18, C01B 33/193. Способ получения микрокремнезема из природного диатомита осаждением раствора азотной кислоты : № 2020116983 : заявл. 22.05.2020 : опубл. 22.01.2021 / В. П. Селяев, Л. И. Куприяшкина, А. А. Седова [и др.]; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва». – EDN NULCZLM.

15. Анализ и определение основных параметров зернистых систем, влияющих на процесс переноса и теплозащитные свойства вакуумных панелей / В. П. Селяев, П. В. Селяев, Е. Л. Кечуткина, Н. Н. Киселев // *Региональная архитектура и строительство*. – 2019. – № 2(39). – С. 11-19. – EDN WLMNFC.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 01.11.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 01.11.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 624.074.1

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

ВАК: 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_105

### ВЗАИМОСВЯЗЬ МАКСИМАЛЬНОГО ПРОГИБА И ЧАСТОТЫ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ В ПЯТИСЛОЙНОЙ ПЛИТЕ ИЗ ДПК ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ШАГА ЛАМЕЛЕЙ В ПОПЕРЕЧНЫХ СЛОЯХ

© Авторы 2024  
SPIN: 7628-8291

**ТРОШИН Михаил Юрьевич**  
аспирант, кафедра строительных конструкций и материалов  
*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева*  
(Россия, Орел, e-mail: mtr997@mail.ru)

SPIN: 7628-8291

**КОРОБКО Андрей Викторович**  
доктор технических наук, профессор, кафедра строительных  
конструкций и материалов  
*Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева*  
(Россия, Орел, e-mail: ankor.66@mail.ru)

**Аннотация.** В настоящем исследовании рассматривается взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в пятислойной плите из древесины перекрестноклееной (ДПК или CLT) при изменении шага ламелей в поперечных слоях при различных граничных условиях конструкции. Для исследования создана расчетная конечно-элементная модель в виде составной пластины с ортотропными свойствами слоев в вычислительном комплексе SCAD++. Основой для исследования служит установленная для изотропных пластин закономерность В.И. Коробко, описывающая связь между максимальным прогибом  $W_0$  и частотой собственных колебаний  $\omega$  конструкции, которая выражена через коэффициент пропорциональности  $K$ . Результатами исследований являются значения максимального прогиба и частоты собственных колебаний в пятислойной плите из ДПК при различных значениях шага ламелей в поперечных слоях, а так же значения коэффициента пропорциональности  $K$ , полученные расчетным способом. Установленная взаимосвязь через расчетное значение коэффициента  $K$  сопоставлена с его аналитическим значением для различных граничных условий. Установлено, что отклонение расчетного значения коэффициента не превышает 2%.

**Ключевые слова:** деревянные конструкции; древесина перекрестноклееная; CLT; максимальный прогиб; частота собственных колебаний; составная пластина; строительные конструкции

**Для цитирования:** Трошин М.Ю., Коробко А.В. Взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний в пятислойной плите из ДПК при изменении шага ламелей в поперечных слоях // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 105-109. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_105.

Original article

### RELATIONSHIP BETWEEN THE MAXIMUM DEFLECTION AND NATURAL VIBRATION FREQUENCY IN A FIVE-LAYER CLT PANEL WITH CHANGING THE PITCH OF LAMELLAE IN TRANSVERSE LAYERS

© The Author(s) 2024

**TROSHIN Mikhail Yuryevich**  
postgraduate student, department of building structures and materials  
*Oryol State University named after I.S. Turgenev*  
(Russia, Oryol, e-mail: mtr997@mail.ru)

**KOROBKO Andrey Viktorovich**  
doctor of technical sciences, professor, department of building structures and materials  
*Oryol State University named after I.S. Turgenev*  
(Russia, Oryol, e-mail: ankor.66@mail.ru)

**Abstract.** The present study examines the relationship between the maximum deflection and natural vibration frequency in a five-layer CLT panel under varying board spacing in the transverse layers under different structural boundary conditions. For the study, a computational finite element model in the form of a composite plate with orthotropic properties of the layers has

been created in the SCAD++ computational complex. The basis for the study is the regularity established for isotropic plates by V.I. Korobko, describing the relationship between the maximum deflection  $W_0$  and the frequency of natural vibrations  $\omega$  of the structure. It is expressed through the proportionality coefficient  $K$ . The results of the study are the values of the maximum deflection and frequency of natural vibrations in a five-layer CLT panel at different values of the pitch of lamellae in the transverse layers, as well as the values of the proportionality coefficient  $K$  obtained by calculation. The established relationship through the calculated value of the coefficient  $K$  is compared with its analytical value for different boundary conditions. It is established that the deviation of the calculated value of the coefficient does not exceed 2%.

**Keywords:** timber structures; cross-laminated timber; CLT panel; maximum defect: natural vibration frequency; composite plate; building structure

**For citation:** Troshin M.Yu., Korobko A.V. Relationship between the maximum deflection and natural vibration frequency in a five-layer clt panel with changing the pitch of lamellae in transverse layers // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 105-109. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_105.

**Введение.** В настоящее время в России начинает активно развиваться многоэтажное деревянное домостроение из-за ряда преимуществ, исходящих из особенностей материала древесины [1-2]. Активное развитие данной сферы стало возможным благодаря появлению технологии производства многослойных перекрестно клееных деревянных панелей (ДПК или CLT).

Особенностью данного материала является перекрестная склейка накрест лежащих слоев ламелей, что позволяет создавать большепролетные плиты (длина ламелей в слоях достигает 18 м и более) [3] различной толщины, обладающие значительно большей несущей способностью [4-7] в отличие от классических деревянных конструкций из-за анизотропных свойств древесины [8].

Ввиду того, что материал является относительно молодым в отечественном строительстве, существует вероятность некачественного производства, проектирования и монтажа строительных конструкций с применением данного материала. Это обуславливает необходимость развития методов контроля качества строительных конструкций. В настоящем исследовании рассматривается динамический метод контроля качества, основанный на взаимосвязи максимального прогиба конструкции и её частоты собственных колебаний.

Для изотропных пластин массой  $m$  профессор В. И. Коробко установил соотношение между максимальным прогибом  $W_0$ , возникающим под действием равномерно распределенной нагрузки  $q$ , и квадратом частоты собственных колебаний  $\omega$ , которая выражается через коэффициент пропорциональности  $K$ , постоянный для различных типов граничных условий [9]:

$$W_0 \cdot \omega^2 = K \frac{q}{m} \quad (1)$$

Дальнейшие исследования [10-13] подтвердили применимость данной закономерности для составных пластин и различных конструкций. Для использования данного уравнения для многослойных плит из ДПК применена расчетная схема, представ-

ляющая собой составную пластину с ортотропными упругими свойствами слоев [14-16].

Цель исследования — проанализировать отношение между максимальным прогибом, вызванным равномерно распределенной нагрузкой, и частотой собственных колебаний в пятислойной плите из древесины перекрестноклееной (ДПК) при варьировании шага ламелей в поперечных слоях плиты.

**Методология.** Для исследований была создана конечно-элементная модель пятислойной плиты из ДПК в вычислительном комплексе SCAD++ длиной  $L=5890$  мм, шириной  $b=1140$  мм, толщиной слоев  $t_{11}=t_{12}=42$  мм, шириной ламелей в слоях  $b_1=190$  мм и шагом ламелей в поперечных слоях  $c$ , равным 190 (ламели плотно примыкают друг к другу), 240, 290 и 340 мм (см. рисунок 1) в виде составной пластины с ортотропными свойствами слоев и размером конечных элементов  $50 \times 50$  мм.

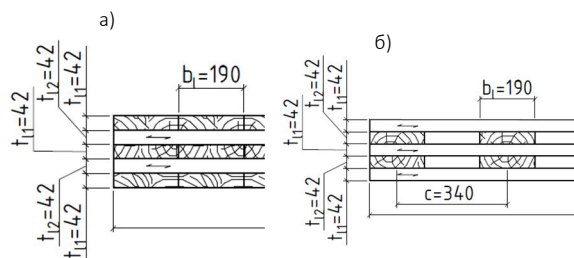


Рисунок 1. Пример сечения пятислойной плиты из ДПК с шагом  $c=340$  мм: а) поперечное сечение; б) продольное сечение

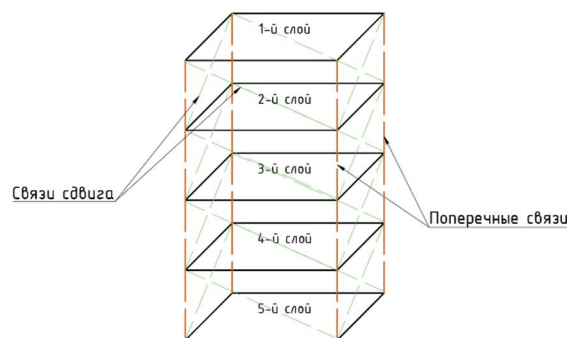


Рисунок 2. Связи плоских КЭ в расчетной модели пятислойной плиты из ДПК

Конечные элементы в слоях соединены с использованием элемента «стержень» в SCAD++ с жесткостью  $EA=5 \times 10^4$  кН, формируя два типа соединений: поперечные, предотвращающие сближение слоёв, и сдвиговые, препятствующие относительным сдвиговым деформациям между слоями (см. рисунок 2).

В рамках исследования разработаны расчетные модели, учитывающие три варианта граничных условий: шарнирное опирание по двум противоположным сторонам плиты (Ш+Ш), сочетание жесткого защемления с одной стороны и шарнирно-подвижной опоры – с другой (Ш+Ж), а также жесткое защемление по обеим противоположным сторонам плиты (Ж+Ж). (см. рисунок 3).

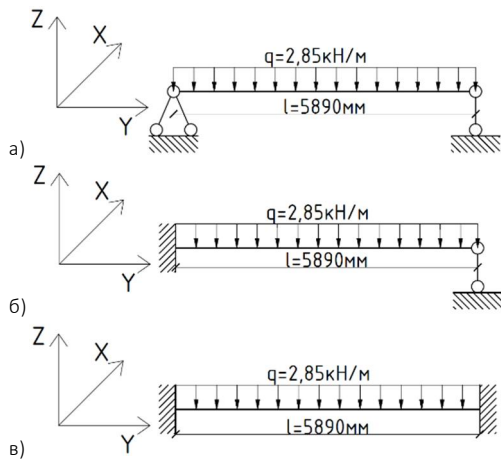


Рисунок 3. Расчетные схемы пятислойной плиты из ДПК с граничными условиями: а) Ш+Ш; б) Ш+Ж; в) Ж+Ж

Таблица 2. Результаты вычислений расчетной схемы пятислойной плиты из древесины перекрестноклееной (ДПК) при изменении шага ламелей в поперечных слоях

Шаг ламелей в поперечных слоях, мм	Максимальный прогиб $W_0$ (мм) при граничных условиях:			Частота собственных колебаний $\omega$ (рад/с) при граничных условиях:			Плотность массы плиты $\rho$ (г/м <sup>3</sup> )	Расчетное $K = \frac{W_0 \cdot \omega^2}{q/m}$ при граничных условиях:			Отклонение $K_{расч}$ от $K_{аналит}$ (%) при граничных условиях:		
	Ш+Ш	Ш+Ж	Ж+Ж	Ш+Ш	Ш+Ж	Ж+Ж		Ш+Ш	Ш+Ж	Ж+Ж	Ш+Ш	Ш+Ж	Ж+Ж
190	6,33	2,62	1,26	68,29	107,18	155,81	0,1220	1,26457	1,28959	1,30624	-0,30	0,32	1,69
240	6,39	2,66	1,29	71,05	111,15	160,80	0,1121	1,26736	1,29246	1,30848	-0,08	0,54	1,86
290	6,45	2,71	1,33	72,92	113,48	163,10	0,1054	1,26822	1,29265	1,30843	-0,01	0,55	1,85
340	6,50	2,78	1,39	74,28	114,70	163,10	0,1009	1,27025	1,29443	1,30863	0,15	0,69	1,87

Для статического расчета на верхний слой составной пластины приложена равномерно распределенная нагрузка величиной  $q=2,85$  кН/м. В динамическом расчете конструкции учтен собственный вес, определённый вычислительным комплексом автоматически на основе заданного объемного веса древесины, равного  $5$  кН/м<sup>3</sup>.

Плоским конечным элементам в слоях присвоены упругие характеристики, учитывающие анизотропные свойства древесины, значения парамет-

ров выбраны с учетом российской нормативной документации [17]:

1) для продольно направленных слоёв:  $E_y=1 \times 10^7$  кН/м<sup>2</sup>,  $E_x=4 \times 10^5$  кН/м<sup>2</sup>,  $G_{xy}=5 \times 10^5$  кН/м<sup>2</sup>,  $\nu_{xy}=0,45$ ,  $\nu_{yx}=0,018$ ;

2) для поперечно направленных слоёв:  $E_{y90}=4 \times 10^5$  кН/м<sup>2</sup>,  $E_{x90}=1 \times 10^7$  кН/м<sup>2</sup>,  $G_{xy90}=5 \times 10^5$  кН/м<sup>2</sup>,  $\nu_{xy90}=0,018$ ,  $\nu_{yx90}=0,45$ .

Таблица 1. Аналитические значения K для различных граничных условий

Ш+Ш	Ж+Ш	Ж+Ж
1	2	3
1,26835	1,28549	1,28420

В таблице 1 отображены значения коэффициента K, полученные аналитическим способом по формуле 1 для разных типов граничных условий.

**Результаты.** Произведен линейный расчет в SCAD++. Вычисленные значения максимальных прогибов и частот собственных колебаний, а также расчетные значения K занесены в таблицу 2.

По полученным данным были построены графики зависимости частот собственных колебаний и максимальных прогибов от шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты из ДПК (см. рисунок 4-5).

Для наглядности построен график изменения расчетного коэффициента K для различных граничных условий (см. рисунок 6).

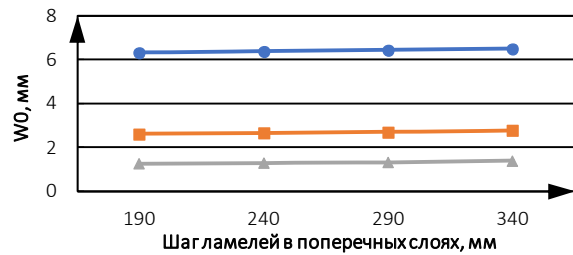


Рисунок 4. Влияние шага ламелей в поперечных слоях на значение максимальных прогибов пятислойной плиты из ДПК при различных граничных условиях

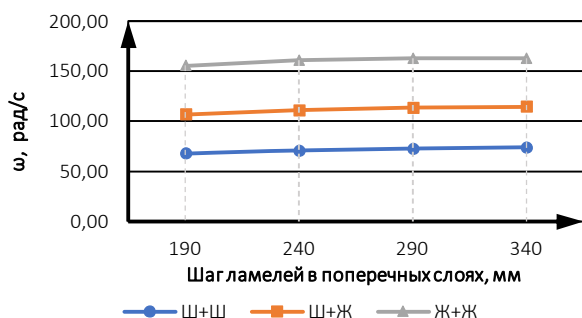


Рисунок 5. Влияние шага ламелей в поперечных слоях на значение частот собственных колебаний пятислойной плиты из ДПК при различных граничных условиях

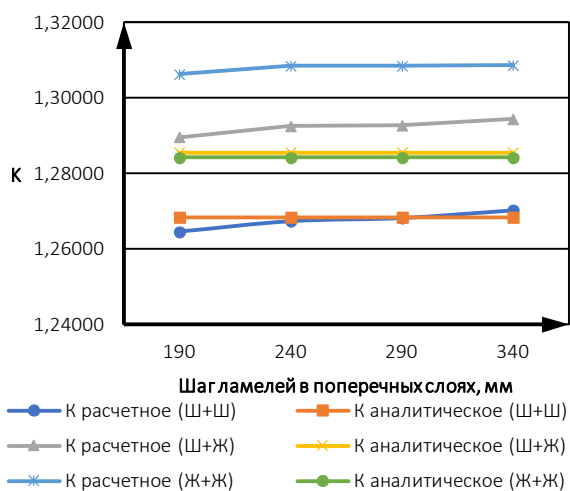


Рисунок 6. Значение расчетного коэффициента K при различных граничных условиях

**Обсуждение.** По рисункам 4 и 5 можно судить о том, что при увеличении шага ламелей в поперечных слоях пятислойной плиты из ДПК у всей конструкции уменьшается изгибная жесткость и масса, в связи с чем незначительно увеличиваются максимальный прогиб и частота собственных колебаний конструкции. При этом, больше всего увеличивается значение максимального прогиба при жестком защемлении с двух сторон и составляет 9,4%; меньше всего – при шарнирном опирании и составляет 2,6%. Значение частоты собственных колебаний, напротив, более всего возрастает при шарнирном опирании (8,1%), менее всего – при жестком защемлении с двух сторон и составляет 4,5%.

Из данных рисунка 6 следует, что отклонение расчетного коэффициента K от аналитического во всех случаях не превышало 2%, что свидетельствует о применимости закономерности, выведенной В.И. Коробко, для пятислойных плит из ДПК с шагом ламелей в поперечных слоях, смоделированных как составная ортотропная пластина. Получение коэффициента K требует высокой точности вычисления всех переменных, входящих в уравнение 1. Столь ма-

лое отклонение говорит о высокой точности проведенных исследований.

### Выводы

По результатам исследования пятислойной плиты из древесины перекрестноклееной на взаимосвязь максимального прогиба и частоты собственных колебаний при изменении шага ламелей в поперечных слоях при различных граничных условиях выявлено, что:

- при увеличении шага ламелей в поперечных слоях во всех случаях незначительно увеличиваются максимальный прогиб и частота собственных колебаний плиты. При этом сильнее всего увеличивается прогиб при жестком защемлении с двух сторон, а частота собственных колебаний – при шарнирном опирании с двух сторон.

- для пятислойных плит из древесины перекрестноклееной (ДПК) с изменяющимся шагом ламелей в поперечных слоях уравнение 1 применяется ко всем типам граничных условий и любым значениям шага. При этом величина шага не оказывает значительного влияния на различие между расчетным и аналитическим значением коэффициента K.

### Библиографический список

1. Есауленко, И.В. Перспективы развития высотного деревянного домостроения в России на примере зарубежного опыта/ И.В. Есауленко. – DOI 10.31660/2782-232X-2021-4-17-25 // Архитектура, строительство, транспорт. – 2021. – № 4. – С. 17-25. – URL: <https://ast.tyuiu.ru/index.php/act/article/view/60>
2. Современные строительные материалы из древесины // URL: <https://lesprominform.ru/jarticles.html?id=5080> (дата обращения: 15.10.2024).
3. ГОСТ Р 56706-2022. Плиты из перекрестноклееной древесины. Общие технические условия.
4. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в трехслойных плитах древесины перекрестно-клееной / М.Ю. Трошин, А.В. Турков. // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: VII Международная научно-практическая конференция, приуроченная к проведению в Российской Федерации Десятилетия науки и технологий 24-25 ноября 2022 года – Омск, 2022 – С.515-519.
5. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага поперечных слоев на деформативность и распределение напряжений в пятислойных плитах древесины перекрестно-клееной // Строительство и реконструкция. 2023;(3):35-41. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2023-107-3-35-41>.
6. Трошин М.Ю., Турков А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, смоделированной как составная пластина / М.Ю. Трошин, А.В. Турков // Архитектура, строительство, транспорт. – 2023. – № 3. – С. 25-32.



7. Трошин М.Ю., Турков А.В., Заев А.В. Влияние шага досок в поперечном слое на деформативность и распределение напряжений в трехслойной CLT-панели, жестко защемленной с двух сторон. Строительство и реконструкция. 2024;(2):50-58. <https://doi.org/10.33979/2073-7416-2024-112-2-50-58>.

8. Ашкенази Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов. М.: Лесная промышленность, 1978. 224 с.

9. Коробко В.И. Об одной "замечательной" закономерности в теории упругих пластинок // Известия вузов. Строительство и архитектура. 1989. № 11. С. 32-36.

10. Коробко В.И., Бояркина О.В. Взаимосвязь задач поперечного изгиба и свободных колебаний треугольных пластинок // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. 2007. № 22 (94). С. 24-26.

11. Турков А. В., Марфин К.В., Баженова А.В. Прогибы и частоты собственных колебаний составных многослойных квадратных изотропных пластин с шарнирным опиранием по контуру при изменении жесткости связей сдвига//Строительство и реконструкция. 2019. №4. С. 65-70.

12. Марфин К. В. Взаимосвязь максимальных прогибов и собственных частот поперечных колебаний составных пластин на податливых связях: автореф. дисс. ... канд. тех. наук : 05.23.17 / Марфин Кирилл Васильевич. — Орел, 2015, 20 с.

13. Турков А. В., Марфин К.В., Ветрова О.А. Прогибы и частоты собственных колебаний систем перекрестных ферм на квадратном плане с различными схемами опирания // Промышленное и гражданское строительство. 2018. №11. С. 42-45.

14. Ржаницын, А.Р. Составные стержни и пластинки / А.Р. Ржаницын. – Москва: Стройиздат, 1986. – 316 с.

15. Филатов В.В. Развитие теории и разработка численной методики расчета составных стержней и пластин. – дисс. ... докт. тех. наук : 05.23.17 / Филатов Владимир Владимирович. – Москва, 2015, 292 с.

16. Филатов В.В. К расчету составных пластин по теории А.Р. Ржаницына. // Труды международной научно-технической конф. «Вычислительная механика деформируемого твердого тела». - М.: МИИТ, 2006. Том 2. С. 414-416.

17. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-25-80.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 28.10.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 28.10.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.

Научная статья

УДК 539.375

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела; 2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_110

## ЗАДАЧА О КРАЕВОЙ ТРЕЩИНЕ В ПОЛУПЛОСКОСТИ

© Авторы 2024

**ПЕРОВА Ольга Сергеевна**

аспирант

*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: o.s.perova@yandex.ru)*

SPIN: 9977-1715

**ЛАВИТ Игорь Михайлович**

доктор физико-математических наук, доцент

*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: igorlavit@yandex.ru)*

**Аннотация.** Задача о растяжении полуплоскости с краевой трещиной распределенной нагрузкой решена Койтером и Уиглсуэртом. Их решения, полученные с помощью интегральных преобразований, весьма сложны; поэтому предпринимались попытки решить задачу другими методами. Эти методы также сложнее классических методов Колосова и Мусхелишвили и пригодны лишь для узкого класса задач. Но может сложиться представление, что классическими методами невозможно решить задачу о трещине в полуплоскости и подобные ей. Это, однако, не так, что подтверждает настоящая работа, в которой задача решается с помощью разложения производных от комплексных потенциалов в степенные ряды в сочетании с конформным отображением единичного круга на рассматриваемую область. Для коэффициентов рядов получается бесконечная система линейных алгебраических уравнений. Достоинства полученного решения заключаются как в общности метода, которым оно получено, так и в его простоте: оно позволяет легко найти не только коэффициент интенсивности напряжений, но и поле напряжений, что имеет большое значение при построении итерационных процессов решения нелинейных задач.

**Ключевые слова:** краевая трещина; поле напряжений; конформное отображение; механика деформируемого твердого тела; строительная механика

**Для цитирования:** Перова О.С., Лавит И.М. Задача о краевой трещине в полуплоскости // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 110-114. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_110.

Original article

## THE PROBLEM OF AN EDGE CRACK IN A HALF-PLANE

© The Author(s) 2024

**PEROVA Olga Sergeevna**

PhD Candidate

*Tula State University*

*(Russia, Tula, e-mail: o.s.perova@yandex.ru)*

**LAVIT Igor Mikhailovich**

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor

*Tula State University*

*(Russia, Tula, e-mail: igorlavit@yandex.ru)*

**Abstract.** The problem of stretching a half-plane with an edge crack by a distributed load was solved by Koiter and Wigglesworth. Their solutions obtained using integral transformations are very complex; therefore, attempts have been made to solve the problem by other methods. These methods are also more complicated than the classical methods of Kolosov and Muskhelishvili and are suitable only for a narrow class of problems. But there may be an idea that it is impossible to solve the problem of a crack in a half-plane and similar problems using classical methods. However, this is not the case, which is confirmed by the

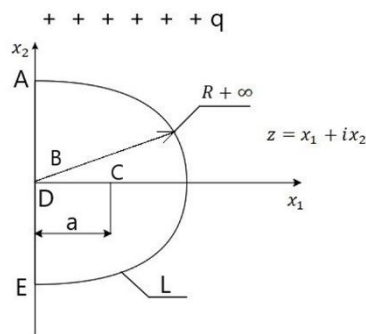


present work. The problem is solved by decomposing derivatives of complex potentials into power series, in combination with a conformal mapping of the unit circle to the area under consideration. For the coefficients of the series, an infinite system of linear algebraic equations is obtained. The advantages of the resulting solution lie both in the generality of the method by which it was obtained and in its simplicity: it makes it easy to find not only the intensity factor of the strain.

**Keywords:** edge crack; stress field; conformal mapping; deformable solid mechanics; construction mechanics

**For citation:** Perova O.S., Lavit I.M. The problem of an edge crack in a half-plane // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 110-114. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_110.

**Введение.** Задача о растяжении полуплоскости с краевой трещиной длиной  $a$  распределенной нагрузкой постоянной интенсивности  $q$  (фиг. 1) решена Койтером [1] и Уиглсуэртом [2]. Эти решения, полученные с помощью интегральных преобразований, весьма сложны; поэтому предпринимались попытки решить задачу другими методами [3-8]. Эти методы, как и методы работ [1-2], сложнее классических методов Колосова и Мухелишвили [9] и пригодны лишь для узкого класса задач. Но может сложиться представление, что классические методы непригодны для рассматриваемой задачи. Это, однако, не так, что подтверждает настоящая работа, в которой задача решается с помощью разложения производных от комплексных потенциалов в степенные ряды в сочетании с конформным отображением единичного круга на рассматриваемую область. Для коэффициентов рядов получается бесконечная система линейных алгебраических уравнений. Достоинства полученного решения заключаются как в общности метода, которым оно получено, так и в его простоте: оно позволяет легко найти не только коэффициент интенсивности напряжений, но и поле напряжений, что имеет большое значение при построении итерационных процессов решения нелинейных задач.



Фигура 1. Расчетная схема

**Постановка задачи.** Поле напряжений, как это обычно делается при решении задач линейной механики разрушения, представляется в виде суммы

$$\sigma_{km} = \sigma_{km0} + \sigma_{km*} \quad (1)$$

где  $\sigma_{km0}$  – номинальные напряжения, то есть напряжения в теле без трещины, а  $\sigma_{km*}$  – поле напряжений, исчезающее на бесконечности и учитывающее гра-

ничные условия на контуре трещины. Номинальные напряжения определяются очевидными формулами:

$$\sigma_{110} = \sigma_{120} = 0, \quad \sigma_{220} = q \quad (2)$$

где  $q$  – интенсивность распределенной нагрузки на бесконечности. Поле напряжений  $\sigma_{km*}$  находится в результате решения следующей краевой задачи: к контуру трещины приложена распределенная нагрузка:

$$p_+ = \{0; q\}, \quad p_- = \{0; -q\} \quad (3)$$

где плюс и минус обозначают соответственно верхнюю и нижнюю кромки трещины; в бесконечно удаленной точке напряжения равны нулю.

Поле напряжений определяется через производные комплексных потенциалов – две голоморфные функции  $\Phi(z), \Psi(z)$  комплексной переменной  $z = x_1 + ix_2$ :

$$\sigma_{11*} + \sigma_{22*} = 2[\Phi(z) + \overline{\Phi(z)}], \quad (4)$$

$$\sigma_{22*} - \sigma_{11*} + 2i\sigma_{12*} = 2[\bar{z}\Phi'(z) + \Psi(z)]$$

где  $i$  – мнимая единица, а черта над символом обозначает комплексное сопряжение. Формулы (4) называются формулами Колосова [9]. Функции  $\Phi(z), \Psi(z)$  находятся из граничных условий [9]

$$[\Phi(t) + \overline{\Phi(t)}]\bar{n} - [\bar{t}\Phi'(t) + \Psi(t)]n = \bar{p}, \quad (5)$$

$$n = n_1 + in_2, \quad p = p_1 + ip_2$$

Здесь  $n_1, n_2$  – компоненты единичной внешней нормали к граничному контуру;  $p_1, p_2$  – компоненты внешней нагрузки;  $t$  – комплексная координата некоторой точки граничного контура.

Известно [10], что поле напряжений сингулярно в кончике трещины. Его асимптотическое поведение описывается формулой

$$z \rightarrow a: \sigma_{km*} \sim (z-a)^{-1/2} F_{km}(\varphi), \quad \varphi = \arg(z) \quad (6)$$

где  $F_{km}(\varphi)$  – функции, регулярные в точке  $z = a$ . Как следует из первого соотношения (4), асимптотическое поведение функции  $\Phi(z)$  аналогично:

$$z \rightarrow a: \Phi(z) \sim C_1(z-a)^{-1/2} \quad (7)$$

где  $C_1$  – некоторая постоянная. Так как во вторую формулу (4) входит  $\Phi'(z)$ , то при условии выполнения соотношения (7) функция  $\Psi(z)$  должна иметь асимптотику



$$z \rightarrow a: \Psi(z) \sim C_2(z-a)^{-3/2} \quad (8)$$

где  $C_2$  – некоторая постоянная. Удобнее в качестве искомой рассматривать функцию  $\Omega(z)$ , имеющую такую же асимптотику, как и функция  $\Phi(z)$ . Ее можно ввести, например, следующим образом

$$\Psi(z) = \Omega(z) - z\Phi'(z) \quad (9)$$

При этом граничное условие (5) преобразуется к виду

$$\left[ \Phi(t) + \overline{\Phi(\bar{t})} \right] \bar{n} + \left[ (t - \bar{t})\Phi'(t) - \Omega(t) \right] n = \bar{p} \quad (10)$$

Сформулируем требования, которым должны удовлетворять функции  $\Phi(z), \Omega(z)$  при  $|z| \rightarrow \infty$ . Они вытекают из граничных условий для полуокружности  $L$  при  $R \rightarrow \infty$  (фиг. 1). Помимо очевидного требования  $p \rightarrow 0$  (см. равенство (10)), необходимо еще выполнение интегральных уравнений равновесия – равенства нулю главного вектора и главного момента сил  $\mathbf{p}$  [9]. Таким образом, граничные условия при  $R \rightarrow \infty$  записываются в виде:

$$\lim_{R \rightarrow \infty} p = 0, \quad \lim_{R \rightarrow \infty} R \int_{-\pi/2}^{\pi/2} p d\varphi = 0, \quad (11)$$

$$\lim_{R \rightarrow \infty} R^2 \int_{-\pi/2}^{\pi/2} (p e^{-i\varphi} - \bar{p} e^{i\varphi}) d\varphi = 0$$

где  $p$  определяется равенством (10), в котором

$$t = R e^{i\varphi}, \quad n = e^{i\varphi} \quad (12)$$

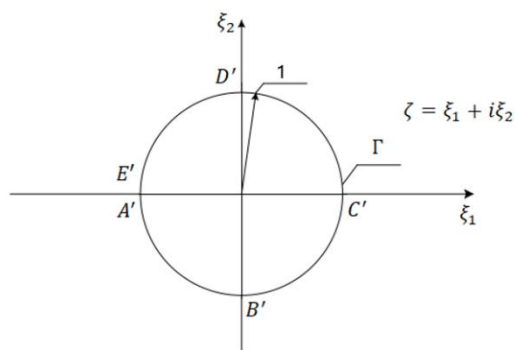
где  $\varphi$  – полярный угол.

**Конформное отображение.** Легко проверить, что функция

$$z = \omega(\zeta) = \sqrt{2a} \frac{(1 + \zeta^2)^{1/2}}{1 + \zeta}, \quad \zeta = \xi_1 + i\xi_2 \quad (13)$$

осуществляет конформное отображение единичного круга (фиг. 2) на полуплоскость с разрезом (фиг. 1). Используется ветвь степенной функции, которая при действительных значениях  $\zeta$  положительна. Производная отображающей функции

$$\omega'(\zeta) = -\frac{\sqrt{2a}(1-\zeta)}{(1+\zeta)^2(1+\zeta^2)^{1/2}} \quad (14)$$



Фигура 2. Единичный круг

обращается в нуль в точке  $C'$  граничного контура  $\Gamma$ . Отметим, что в класс допустимых отображающих функций, определенный в работе [11], входят только функции, имеющие ненулевую производную внутри и на границе единичного круга. Использование отображающей функции (13) возможно благодаря замене функции  $\Psi(z)$  на функцию  $\Omega(z)$ .

Множитель, обуславливающий сингулярность поля напряжений, преобразуется при конформном отображении следующим образом:

$$(z-a)^{1/2} = \frac{\sqrt{a}(1-\zeta)}{\left\{ (1+\zeta) \left[ \sqrt{2}(1+\zeta^2)^{1/2} + 1 + \zeta \right] \right\}^{1/2}} \quad (15)$$

Отсюда следует, что функции  $\Phi(\zeta), \Omega(\zeta)$  должны содержать в знаменателе множитель  $(1-\zeta)$ .

Граничное уравнение (10) приводится к виду

$$\left[ \Phi(\tau) + \overline{\Phi(\bar{\tau})} \right] \bar{n} + \left[ \frac{\omega(\tau) - \overline{\omega(\bar{\tau})}}{\omega'(\tau)} \Phi'(\tau) - \Omega(\tau) \right] n = \bar{p},$$

$$\frac{\omega(\tau) - \overline{\omega(\bar{\tau})}}{\omega'(\tau)} = \frac{1+\tau}{1-\tau} \left[ \frac{(1+\tau)|1+\tau^2|}{1+\bar{\tau}} - (1+\tau^2) \right] \quad (16)$$

Бесконечно удаленная точка на плоскости  $z$  отображается в точку  $\zeta = -1$ . Так как напряжения (4) на бесконечности обращаются в нуль, функции  $\Phi(\zeta), \Omega(\zeta)$  должны содержать в числителе множитель  $(1+\zeta)$ . Приходим к выражениям

$$\Phi(\zeta) = \frac{1+\zeta}{1-\zeta} \Phi_*(\zeta), \quad \Omega(\zeta) = \frac{1+\zeta}{1-\zeta} \Omega_*(\zeta) \quad (17)$$

где  $\Phi_*(\zeta), \Omega_*(\zeta)$  – функции, голоморфные внутри единичного круга и непрерывные на его границе  $\Gamma$ .

Отображение, обратное отображению (13), имеет вид

$$\zeta = -\frac{z_*^2 - 2}{2(z_*^2 - 1)^{1/2} + z_*^2}, \quad z_* = \frac{z}{a} \quad (18)$$

Чтобы преобразовать граничные условия (11), подставим в правую часть равенства (18) вместо  $z$  величину  $t$ , определенную формулой (12). Получим

$$\tau = -1 + 2\rho e^{-i\varphi} - 2\rho^2 e^{-2i\varphi} + o(\rho^2), \quad \rho = \frac{a}{R} \rightarrow 0 \quad (19)$$

Выражение (16) с учетом формул (12) и (19) приводится к виду

$$\bar{p} = \rho \left[ (2e^{-2i\varphi} - 1) \Phi_*(-1) + \bar{\Phi}_*(-1) - \Omega_*(-1) \right] +$$

$$+ 2\rho^2 \left[ e^{-i\varphi} (3e^{-2i\varphi} - 2) \Phi_*'(-1) + e^{i\varphi} \bar{\Phi}_*'(-1) - e^{-i\varphi} \Omega_*'(-1) \right] +$$

$$+ o(\rho^2) \quad (20)$$



Первое из граничных условий (11) удовлетворяется тождественно. Подстановка равенства (20) во второе граничное условие (11) приводит к уравнению:

$$\Phi_*(-1) - \bar{\Phi}_*(-1) + \Omega_*(-1) = 0 \quad (21)$$

а в третье – к двум уравнениям:

$$\text{Im}[\Phi_*(-1)] = 0, \quad \text{Im}[2\Phi'_*(-1) + \Omega'_*(-1)] = 0 \quad (22)$$

Рассмотрим теперь граничные условия на контуре  $\Gamma$ . В данном случае:

$$\tau = \frac{1}{\bar{\tau}} = e^{i\theta}, \quad \theta \in (-\pi; \pi) \quad (23)$$

Граничное уравнение (16) преобразуется следующим образом:

$$\begin{aligned} (1+\tau) \left\{ \left[ \Phi_*(\tau) - \bar{\Phi}_*(\tau) \right] f_1(\tau, \bar{\tau}) + \right. \\ \left. + (1+\tau) \Phi'_*(\tau) f_2(\tau, \bar{\tau}) + \right. \\ \left. + \Phi_*(\tau) f_2(\tau, \bar{\tau}) - \Omega_*(\tau) \right\} = f_0(\tau, \bar{\tau}), \\ f_0(\tau, \bar{\tau}) = (1-\tau) \frac{\bar{n}}{n}, \\ f_1(\tau, \bar{\tau}) = \frac{\bar{n}}{n}, \quad f_2(\tau, \bar{\tau}) = \frac{\tau|1+\tau^2| - (1+\tau^2)}{1-\tau}, \\ f_3(\tau, \bar{\tau}) = \frac{2f_2(\tau, \bar{\tau})}{1-\tau} \end{aligned} \quad (24)$$

Уравнение (24) совместно с уравнениями (21), (22) позволяет определить функции  $\Phi_*(\zeta), \Omega_*(\zeta)$  и тем самым решить поставленную задачу.

**Решение граничного уравнения.** Голomorphic в единичном круге функции  $\Phi_*(\zeta), \Omega_*(\zeta)$  разлагаются в нем в степенные ряды

$$\Phi_*(\zeta) = \sum_{k=0}^{\infty} b_k \zeta^k, \quad \Omega_*(\zeta) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k \zeta^k \quad (25)$$

Решение задачи сводится к нахождению коэффициентов  $b_k, c_k$ . Чтобы использовать для этого уравнение (24), необходимо разложить входящие в него функции  $f_m(\tau, \bar{\tau}), m=0, \dots, 3$  в степенные ряды по аргументу  $\tau$ . В данном случае это возможно, так как на контуре  $\Gamma$  справедливы соотношения (23). С их учетом функции  $f_m$  могут быть представлены как функции угла  $\theta$ :

$$\begin{aligned} f_0(\theta) &= \begin{cases} q, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \\ 0, \theta \notin \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \\ f_1(\theta) &= \begin{cases} -1, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \\ 1, \theta \notin \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \end{aligned}$$

$$f_2(\theta) = \begin{cases} 0, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \\ 2\cos\theta \left(1 - i\text{ctg}\frac{\theta}{2}\right), \theta \notin \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \end{cases} \quad (26)$$

$$f_3(\theta) = \begin{cases} 0, \theta \in \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \\ \frac{4\cos\theta}{1-\cos\theta}, \theta \notin \left(-\frac{\pi}{2}; \frac{\pi}{2}\right) \end{cases}$$

Эти функции разложимы в комплексный ряд Фурье [12] в интервале  $(-\pi; \pi)$ :

$$f_m(\theta) = \sum_{-\infty}^{\infty} g_{mn} e^{in\theta}, \quad g_{mn} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f_m(\theta) e^{-in\theta} d\theta, \quad m=0, \dots, 3 \quad (27)$$

Коэффициенты  $g_{mn}$  рядов получаются в виде:

$$\begin{aligned} g_{00} = \frac{q}{2}, \quad g_{0n} &= \begin{cases} \frac{q(-1)^{j-1}}{\pi n}, n=2j-1, \\ 0, (n=2j) \wedge (j \neq 0) \end{cases} \\ g_{1n} &= \begin{cases} \frac{2(-1)^j}{\pi n}, n=2j-1 \\ 0, n=2j \end{cases} \\ g_{2n} &= -\frac{2}{\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{\cos\theta}{\sin(\theta/2)} \sin(n\theta - \theta/2) d\theta, \\ g_{3n} &= \frac{4}{\pi} \int_{\pi/2}^{\pi} \frac{\cos\theta \cos n\theta}{1-\cos\theta} d\theta \end{aligned} \quad (28)$$

Отметим, что все коэффициенты  $g_{mn}$  действительны. Ряды (27) удобно записать, с учетом выражения (23), как

$$f_m(\tau) = g_{m0} + \sum_{n=1}^{\infty} (g_{mn} \tau^n + h_{mn} \tau^{-n}), \quad h_{mn} = g_{m(-n)} \quad (29)$$

Подстановка выражений (25) и (29) в уравнение (24) приводит последнее к виду

$$\begin{aligned} (1+\tau) \sum_{k=0}^{\infty} \left\{ (b_k \tau^k - \bar{b}_k \tau^{-k}) \left[ g_{10} + \sum_{n=1}^{\infty} (g_{1n} \tau^n + h_{1n} \tau^{-n}) \right] + \right. \\ \left. + (1+\tau) k b_k \tau^{k-1} \left[ g_{20} + \sum_{n=1}^{\infty} (g_{2n} \tau^n + h_{2n} \tau^{-n}) \right] + \right. \\ \left. + b_k \tau^k \left[ g_{30} + \sum_{n=1}^{\infty} (g_{3n} \tau^n + h_{3n} \tau^{-n}) \right] - c_k \tau^k \right\} = \\ = (1-\tau) \left[ g_{00} + \sum_{j=1}^{\infty} (g_{0j} \tau^j + h_{0j} \tau^{-j}) \right] \end{aligned} \quad (30)$$

Приравнивая коэффициенты при одинаковых степенях  $\tau$  в левой и правой частях уравнения (30), получаем бесконечную систему комплексных линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных  $b_k, c_k$ . Добавив к ней уравнения (21), (22), приходим к системе уравнений, имеющей, в силу теорем о существовании и единственности решения



второй краевой задачи теории упругости [9], единственное решение. При разделении действительных и мнимых частей этой системы она распадается, вследствие действительности коэффициентов  $g_{mn}$ , на две системы уравнений: одну, в которую входят только действительные части неизвестных  $b_k, c_k$ , и вторую, содержащую только их мнимые части. Вторая система однородна и имеет единственное решение – тривиальное. Таким образом, величины  $b_k, c_k$  действительны. Этот вывод можно также получить, рассматривая условия симметрии задачи. При действительных  $b_k, c_k$  уравнения (22) удовлетворяются тождественно, а уравнение (21) принимает вид

$$\Omega_*(-1) = 0 \quad (31)$$

**Результаты расчетов.** При проведении расчетов ряды (25) заменяются их частичными суммами

$$\Phi_*(\zeta) \approx \sum_{k=0}^N b_k \zeta^k, \quad \Omega_*(\zeta) \approx \sum_{k=0}^N c_k \zeta^k \quad (32)$$

Система уравнений относительно  $b_k, c_k$  получается в результате приравнивания в левой и правой частях уравнения (30) коэффициентов при одинаковых степенях  $\tau$  с показателями степени от  $-N$  до  $N$ . К этой системе добавляется уравнение (31), которое записывается в виде:

$$\sum_{k=0}^N (-1)^k c_k = 0 \quad (33)$$

Получается система  $2N+2$  линейных алгебраических уравнений относительно  $2N+2$  неизвестных  $b_k, c_k$ . Ее решение позволяет легко определить напряженное состояние с помощью формул (32), (18), (17), (4). Коэффициент интенсивности напряжений вычисляется по формуле [10]

$$K_I = 2\sqrt{2\pi} \lim_{z \rightarrow a} [(z-a)^{1/2} \Phi(z)] = 2\sqrt{\pi a} \sum_{k=0}^N b_k \quad (34)$$

В таблице представлены результаты расчетов безразмерной величины  $K_{I*} = K_I / (q\sqrt{\pi a})$  при различных значениях  $N$ :

№	5	10	20	40	100	150	200	300
$K_{I*}$	1,39059	1,12743	1,12453	1,12369	1,12214	1,12182	1,1217	1,1216
№	400	600	800	1000				
$K_{I*}$	1,12156	1,12153	1,12152	1,12152				

Можно отметить достаточно быструю сходимость решения с ростом  $N$ . Результаты численного решения также можно сопоставить с результатом

аналитического решения, даваемого формулой Уиглсуэрта [2]:

$$K_{I*} = \exp \left[ -\frac{1}{\pi} \int_0^\infty \frac{\ln \left( 1 - \frac{\eta^2}{\text{sh}^2(0.5\pi\eta)} \right)}{1 + \eta^2} d\eta \right] \quad (35)$$

По этой формуле для  $K_{I*}$  получается значение, с точностью до шести значащих цифр равное 1.12152.

**Заключение.** Метод, которым получено приведенное выше решение, представляет собой не принципиальную модификацию метода, изложенного в работе [11]. Он может быть использован и при решении других задач механики разрушения. Ограничения его применимости связаны только с невозможностью найти отображающую функцию  $\omega(\zeta)$ .

#### Библиографический список

- Bentham J.P., Koiter W.T. Asymptotic approximations to crack problems // Mech. of fracture. V.1. Methods of analysis and solutions of crack problems. Leyden: Noordhoff. 1973. P.131–178.
- Wigglesworth L.A. Stress distribution in a notched plate // Mathematika. – 1957. – V. 4. – P. 76–96.
- Kaya A.C., Erdogan F. On the solution of integral equations with strongly singular kernels // Quart. Appl. Math. 1987. V. 45. № 1. P. 105–122.
- Zang W., Gudmundson P. An integral equation method for piece-wise smooth cracks in an elastic half-plane // Eng. Fract. Mech. 1989. V. 32. № 6. P. 889–897.
- Chen Y.Z., Cheung Y.K. New integral equation approach for the crack problem in elastic half-plane // Int. J. Fract., 1990. V. 46. № 1. P. 57–69.
- Chen Y.Z. Various integral equations for a single crack problem of elastic half-plane // Eng. Fract. Mech. 1994. V. 49. № 6. P. 849–858.
- Лавит И.М. Граничное интегральное уравнение для криволинейной краевой трещины // Прикладная математика и механика. 1994. Т.58. Вып.1. С. 153–161.
- Kim P., Choi U.J. Two trigonometric quadrature formulae for evaluating hypersingular integrals // Int. J. Numer. Meth. Engng. 2003. V. 56. № 4. P. 469–486.
- Лурье А.И. Теория упругости. М.: Наука, 1970. 940 с.
- Си Г., Либовиц Г. Математическая теория хрупкого разрушения // Разрушение. Т.2. М.: Мир, 1975. С. 83–203.
- Мусхелишвили Н.И. Некоторые основные задачи математической теории упругости. М.: Наука, 1966. 707 с.
- Курант Р. Курс дифференциального и интегрального исчисления. Т. 1. М.: Наука, 1967. 704 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 17.10.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 17.10.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.



Научная статья

УДК 539.3

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела; 2.1.9. Строительная механика

DOI 10.51608/26867818\_2024\_4\_115

## ОБ УСТОЙЧИВОСТИ ДЕФОРМИРОВАНИЯ УПРУГОГО ТЕЛА ПРИ КВАЗИСТАТИЧЕСКОМ НАГРУЖЕНИИ

© Авторы 2024      **ПЕРОВА Ольга Сергеевна**  
аспирант  
*Тульский государственный университет*  
(Россия, Тула, e-mail: o.s.perova@yandex.ru)

SPIN: 9977-1715      **ЛАВИТ Игорь Михайлович**  
доктор физико-математических наук, доцент  
*Тульский государственный университет*  
(Россия, Тула, e-mail: igorlavit@yandex.ru)

**Аннотация.** В работе изложен метод, занимающий промежуточное положение между двумя различными подходами к постановке задачи об устойчивости деформируемого твердого тела. Используется допущение о малости деформаций. Рассмотрена задача об устойчивости равновесия упругого тела как задача о бифуркации напряженно-деформированного состояния. В качестве примера применения метода приведено решение задачи Эйлера.

**Ключевые слова:** устойчивость; бифуркация равновесия; критическая нагрузка; закон Гука; механика деформируемого твердого тела

**Для цитирования:** Перова О.С., Лавит И.М. Об устойчивости деформирования упругого тела при квазистатическом нагружении // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 115-119. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_115.

Original article

## ON THE STABILITY OF DEFORMATION OF AN ELASTIC BODY UNDER QUASI-STATIC LOADING

© The Author(s) 2024      **PEROVA Olga Sergeevna**  
PhD Candidate  
*Tula State University*  
(Russia, Tula, e-mail: o.s.perova@yandex.ru)

**LAVIT Igor Mikhailovich**  
Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Associate Professor  
*Tula State University*  
(Russia, Tula, e-mail: igorlavit@yandex.ru)

**Abstract.** The paper describes a method that occupies an intermediate position between two different approaches to the formulation of the problem of stability of a deformable solid. The assumption of small deformations is used. The issue of stability of the equilibrium of an elastic body is considered as a difficulty of bifurcation of a stress-strain state. The solution of the Euler problem is given as an example of the application of the method.

**Keywords:** stability; equilibrium bifurcation; critical load; Hooke's law; deformable solid mechanics

**For citation:** Perova O.S., Lavit I.M. On the stability of deformation of an elastic body under quasi-static loading // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 115-119. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_115.

**Введение.** К постановке задачи об устойчивости деформируемого твердого тела есть два различных подхода. Первый из них, восходящий еще к Эйлеру [1], заключается в следующем. Априорно вво-



дится предположение о форме потерявшего устойчивость тела, и выявляются компоненты вектора перемещений, обуславливающие эту форму. Далее задача формулируется как обычная задача для малых деформаций и перемещений, но упомянутые компоненты вектора перемещений не рассматриваются как малые. В результате получается однородная система линейных уравнений, условие существования нетривиального решения которой позволяет найти критическую нагрузку.

Второй подход ([2-5] и др.) заключается в изначальной формулировке задачи как нелинейной. Далее проводится линеаризация в окрестности основного напряженного состояния и, таким образом, получается однородная система линейных уравнений (уравнения в вариациях), поиск нетривиальных решений которой приводит к нахождению критической нагрузки.

Второй подход более строгий: он не требует предварительного анализа и основанного на нем изменения уравнений задачи и (или) граничных условий. Зато он намного сложнее, так как предполагает использование нелинейных определяющих соотношений.

Изложенный ниже метод занимает промежуточное положение между этими двумя. При этом он сохраняет строгость второго подхода и не намного сложнее первого. Единственное используемое в нем предположение – предположение о малости деформаций, из которого следует справедливость закона Гука.

**Постановка задачи.** Рассматривается деформирование упругого тела под действием квазистатической нагрузки, величина и распределение которой полностью определяются значением параметра нагружения. При некоторой величине этого параметра, называемой критической величиной, возможна бифуркация напряженно-деформированного состояния. Появление этой бифуркации квалифицируется как потеря устойчивости основного состояния деформирования, или просто как потеря устойчивости.

Положение точек тела характеризуется набором эйлеровых координат  $y^{(k)}$ , где индекс  $k$  пробегает значения от 1 до 3. Во избежание путаницы индексы, относящиеся к эйлеровым координатам, заключаются в скобки.

Наряду с эйлеровыми используются также лагранжевы координаты  $x^k$ . Системы координат  $x^k$ ,  $y^{(k)}$  связаны между собой зависимостями, определение которых равносильно решению задачи механики деформируемого твердого тела:

$$y^{(k)} = y^{(k)}(x^m, t); \quad x^m = x^m(y^{(k)}, t) \quad (1)$$

где  $t$  – время. В квазистатических задачах вместо времени можно использовать какую-либо монотонную функцию времени, называемую времениподобным параметром.

Пусть  $dr$  – бесконечно малый вектор, соединяющий точку с координатами  $y^{(k)}$  и точку с координатами  $y^{(k)} + dy^{(k)}$ . Его можно представить в виде:

$$dr = e_{(k)} dy^{(k)} \quad (2)$$

где  $e_{(k)}$  – векторный базис эйлеровой системы координат. Если бесконечно малые приращения координат  $y^{(k)}$  находятся при неизменных значениях  $x^m$  и времени, то они представляют собой вариации  $\delta y^{(k)}$ . Из соотношения (2) следует:

$$\delta r = e_{(k)} \delta y^{(k)} \quad (3)$$

Пусть теперь бесконечно малые приращения координат  $y^{(k)}$  обусловлены изменением  $x^m$  при неизменном  $t$ . Получим

$$dr = e_{(k)} dy^{(k)} = e_{(k)} \frac{\partial y^{(k)}}{\partial x^m} dx^m = f_m dx^m \quad (4)$$

где  $f_m$  – базис лагранжевой системы координат. Введем обозначения

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x^m} &= \partial_m; & \frac{\partial}{\partial y^{(m)}} &= \partial_{(m)}; \\ h_m^{(k)} &= \partial_m y^{(k)}; & h_{(k)}^m &= \partial_{(k)} y^m; \Rightarrow \\ h_m^{(k)} h_{(n)}^m &= \delta_{(n)}^{(k)}, & h_m^{(k)} h_n^{(m)} &= \delta_m^n \end{aligned} \quad (5)$$

где  $h_m^{(k)}$ ,  $h_{(k)}^m$  – взаимно обратные матрицы перехода,  $\delta_m^n$  – символ Кронекера. Получаем

$$e_{(k)} = h_{(k)}^m f_m; \quad f_k = h_k^{(m)} e_{(m)} \quad (6)$$

Для каждой точки сплошной среды лагранжевы координаты неизменны, но лагранжев базис  $f_m$  меняется со временем и, наоборот, эйлеровы координаты меняются со временем, но эйлеров базис  $e_{(k)}$  от времени не зависит.

Компоненты метрического тензора определяются равенствами

$$g_{(i)(j)} = e_{(i)} \cdot e_{(j)}; \quad g_{km} = f_k \cdot f_m \quad (7)$$

где точка обозначает скалярное произведение векторов. Очевидно, что

$$g_{km} = h_k^{(i)} h_m^{(j)} g_{(i)(j)}; \quad g_{(i)(j)} = h_{(i)}^k h_{(j)}^m g_{km} \quad (8)$$

Уравнение равновесия записывается в виде

$$\nabla \cdot \hat{\sigma} + \zeta = 0 \quad (9)$$

где  $\nabla$  – оператор Гамильтона,  $\hat{\sigma}$  – тензор напряжений,  $\zeta$  – вектор объемных сил. Инерционными силами пренебрегаем (задача квазистатическая).

Граничные условия могут быть двух типов: главные (существенные, кинематические) и естественные (статические). Пусть  $S_1$  – часть граничной поверхности, где заданы главные условия, а  $S_2$  – часть граничной поверхности, где заданы естественные условия. Такое деление весьма условно. В одной и той же точке граничное условие по одной ко-



ординате может быть главным, а по другой – естественным. Но оно (деление) полезно для формулировки граничных условий. Итак, пусть  $x^k \in S_1$ . При этом

$$y^{(m)}(x^k) = a^{(m)} \quad (10)$$

где  $a^{(m)}$  – заданные функции  $x^k$  и  $t$ . Задачу всегда можно переформулировать таким образом, что главные граничные условия станут нулевыми [6]. Это достигается за счет изменения объемных сил  $\zeta$ . Поэтому ниже без потери общности полагается  $a^{(m)} = 0$ .

Пусть теперь  $y^{(k)} \in S_2$ . Естественное граничное условие имеет вид

$$\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \mathbf{p} \quad (11)$$

где  $\mathbf{n}$  – единичная внешняя нормаль к поверхности  $S_2$ ,  $\mathbf{p}$  – заданная поверхностная нагрузка.

Граничные условия, как легко видеть, формулируются в эйлеровых координатах. При постановке задач устойчивости естественно считать, что бифуркация напряженного состояния происходит при неизменной нагрузке.

**Слабая постановка задачи.** Для решения задач устойчивости обычно приходится использовать численные методы, поэтому сформулируем слабую постановку задачи. Рассмотрим вариацию работы внешних сил

$$\delta W = \int_S \mathbf{p} \cdot \delta \mathbf{r} dS \quad (12)$$

где  $S$  – вся поверхность тела. При этом предполагается, что поле скоростей согласуется с нулевыми главными граничными условиями. Поэтому на той части поверхности, где заданы главные граничные условия, подынтегральная функция обращается в нуль. С учетом равенства (11) получим:

$$\begin{aligned} \delta W &= \int_S (\hat{\sigma} \cdot \mathbf{n}) \cdot \delta \mathbf{r} dS = \int_S \mathbf{n} \cdot \hat{\sigma}^T \cdot \delta \mathbf{r} dS = \\ &= \int_V \nabla \cdot (\hat{\sigma} \cdot \delta \mathbf{r}) dV = \\ &= \int_V [(\nabla \cdot \hat{\sigma}) \cdot \delta \mathbf{r} + \hat{\sigma} \cdot \nabla \delta \mathbf{r}] dV = \\ &= \int_V (\hat{\sigma} \cdot \delta \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} - \zeta \cdot \delta \mathbf{r}) dV \end{aligned} \quad (13)$$

$$\text{где } \delta \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} = \frac{1}{2} [\nabla \delta \mathbf{r} + (\nabla \delta \mathbf{r})^T] \quad (14)$$

– вариация тензора деформаций [7]. При выводе использовалось равенство (9), теорема о дивергенции, условие симметричности тензора напряжений  $\hat{\sigma} = \hat{\sigma}^T$ , где индекс  $T$  обозначает транспонирование. Приравнявая правые части равенств (12) и (13), получим

$$\int_V \hat{\sigma} \cdot \delta \hat{\boldsymbol{\varepsilon}} dV = \int_S \mathbf{p} \cdot \delta \mathbf{r} dS + \int_V \zeta \cdot \delta \mathbf{r} dV \quad (15)$$

В координатном виде равенства (14) и (15) запишутся следующим образом:

$$\begin{aligned} \int_V \sigma^{km} \delta \varepsilon_{km} dV &= \int_S p^k \delta r_k dS + \int_V \zeta^k \delta r_k dV; \\ \delta \varepsilon_{km} &= \frac{1}{2} (D_k \delta r_m + D_m \delta r_k); \end{aligned} \quad (16)$$

$$D_k \delta r_m = \partial_k \delta r_m - \Gamma_{km}^n \delta r_n$$

Здесь  $D_k \delta r_m$  – ковариантная производная,  $\Gamma_{km}^n$  – символы Кристоффеля:

$$\Gamma_{km}^n = \frac{g^{nl}}{2} (\partial_k g_{ml} + \partial_m g_{kl} - \partial_l g_{km}) \quad (17)$$

**Бифуркация состояния равновесия.** Пусть все величины, входящие в равенства (16), (17) (за исключением  $\delta r_m$ , которые могут принимать произвольные значения, совместимые со связями, или, иначе, главными граничными условиями), представляются в виде:

$$\begin{aligned} \sigma^{km} &= \sigma_0^{km} + \sigma_{*}^{km}; \quad V = V_0 + V_*; \\ p^k &= p_0^k + p_*^k; \quad \zeta^k = \zeta_0^k + \zeta_*^k; \\ S &= S_0 + S_*; \quad g_{km} = g_{0km} + g_{*km}; \\ \Gamma_{km}^n &= \Gamma_{0km}^n + \Gamma_{*km}^n \end{aligned} \quad (18)$$

где величины, помеченные нулем, относятся к основному состоянию и известны, а величины, помеченные звездочкой, неизвестны и малы по сравнению с величинами, помеченными нулем. Поэтому можно во всех выражениях удерживать величины со звездочкой только в первой степени. Вариационное уравнение (16) преобразуется к виду

$$\begin{aligned} D_{0k} \delta r_m &= \partial_k \delta r_m - \Gamma_{0km}^n \delta r_n; \quad D_{*k} \delta r_m = -\Gamma_{*km}^n \delta r_n; \\ \delta \varepsilon_{0km} &= \frac{1}{2} (D_{0k} \delta r_m + D_{0m} \delta r_k); \\ \delta \varepsilon_{*km} &= \frac{1}{2} (D_{*k} \delta r_m + D_{*m} \delta r_k); \\ \int_V \sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{0km} dV_0 + \int_V \sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{0km} dV_* + \\ &+ \int_V (\sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{*km} + \sigma_*^{km} \delta \varepsilon_{0km}) dV_0 = \\ &= \int_{S_0} p_0^k \delta r_k dS_0 + \int_{S_*} p_*^k \delta r_k dS_* + \int_{S_0} p_*^k \delta r_k dS_0 + \\ &+ \int_{V_0} \zeta_0^k \delta r_k dV_0 + \int_{V_*} \zeta_*^k \delta r_k dV_* + \\ &+ \int_{V_0} \zeta_*^k \delta r_k dV_0 \end{aligned} \quad (19)$$

Вариационное уравнение для основного состояния записывается в очевидной форме:

$$\int_{V_0} \sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{0km} dV_0 = \int_{S_0} p_0^k \delta r_k dS_0 + \int_{V_0} \zeta_0^k \delta r_k dV_0 \quad (20)$$

Оставшиеся слагаемые в уравнении (19) относятся к возмущенному состоянию:

$$\begin{aligned} \int_{V_*} \sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{0km} dV_* + \int_{V_0} (\sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{*km} + \sigma_*^{km} \delta \varepsilon_{0km}) dV_0 = \\ = \int_{S_*} p_*^k \delta r_k dS_* + \int_{S_0} p_*^k \delta r_k dS_0 + \int_{V_*} \zeta_*^k \delta r_k dV_* + \int_{V_0} \zeta_*^k \delta r_k dV_0 \end{aligned} \quad (21)$$



Если при потере устойчивости граничные условия неизменны, то правая часть в уравнении (21) равна нулю. Получим в этом случае:

$$\int_{V_*} \sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{0km} dV_* + \int_{V_0} (\sigma_0^{km} \delta \varepsilon_{*km} + \sigma_*^{km} \delta \varepsilon_{0km}) dV_0 = 0 \quad (22)$$

Отметим, что

$$dV = dV_0 + dV_* = \sqrt{G} dx^1 dx^2 dx^3; \quad G = \det(g_{ik}) \quad (23)$$

**Упругое деформирование.** Пусть в естественном состоянии выполняется соотношение:

$$g_{km} = g_{(k)(m)} = c_{km}(x_n) \quad (24)$$

где  $c_{km}(x_n)$  – известные функции. В декартовой системе координат  $c_{km}$  – константы. Линейная часть  $\varepsilon_{km}$  тензора Коши–Грина [7]

$$e_{km} = \frac{1}{2}(g_{km} - c_{km}) \quad (25)$$

называется тензором малых деформаций. Если деформации малы, а именно такой случай рассматривается в данной работе, то тензор напряжений связан с тензором малых деформаций законом Гука [4].

**Пример расчета. Задача Эйлера.** Рассматривается стержень длиной  $l$ , сжатый нагрузкой  $P$ .

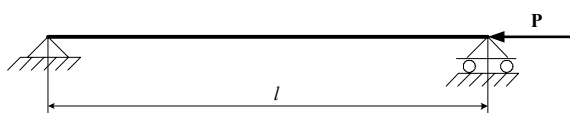


Рис. 1. Расчетная схема

Для простоты расчета поперечное сечение стержня выбирается в виде прямоугольника шириной  $b$  и высотой  $h$ . Основное состояние – сжатие стержня, при котором он остается прямолинейным, – определяется следующими формулами:

$$y_0^{(1)} = (1 + \alpha)x^1; \quad y_0^{(2)} = (1 + \beta)x^2; \quad y_0^{(3)} = (1 + \gamma)x^3 \quad (26)$$

где  $\alpha, \beta, \gamma$  – константы. Так как деформации малы, справедливы неравенства:

$$|\alpha| \ll 1; \quad |\beta| \ll 1; \quad |\gamma| \ll 1 \quad (27)$$

Все последующие формулы записаны с учетом этого условия. Система эйлеровых координат – декартова. Это значит, что:

$$g_{(i)(k)} = g^{(i)(k)} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

Найдем матрицу перехода

$$h_{0m}^{(k)} = \partial_m y_0^{(m)} = \begin{pmatrix} 1 + \alpha & 0 & 0 \\ 0 & 1 + \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \gamma \end{pmatrix} \quad (29)$$

и компоненты метрического тензора в лагранжевой системе координат:

$$g_{0ik} = h_{0i}^{(m)} h_{0k}^{(n)} g_{(m)(n)} =$$

$$= \begin{pmatrix} (1 + \alpha)^2 & 0 & 0 \\ 0 & (1 + \beta)^2 & 0 \\ 0 & 0 & (1 + \gamma)^2 \end{pmatrix} = \quad (30)$$

$$= \begin{pmatrix} 1 + 2\alpha & 0 & 0 \\ 0 & 1 + 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 + 2\gamma \end{pmatrix}$$

Напряженное состояние однородно; из граничных условий следует:

$$\sigma_{011} = \sigma_0^{11} = -\frac{P}{F} \quad (31)$$

а остальные компоненты тензора напряжений основного состояния равны нулю. Закон Гука дает:

$$\varepsilon_{011} = \alpha = \frac{\sigma_{011}}{E} = -\frac{P}{EF}; \quad \varepsilon_{022} = \varepsilon_{033} = \beta = \gamma = -\nu\alpha \quad (32)$$

где  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коэффициент Пуассона, а  $F$  – площадь поперечного сечения. Найдем  $G_0$ :

$$G_0 = \det(g_{0ik}) = 1 + 2(\alpha + \beta + \gamma) \quad (33)$$

Символы Кристоффеля  $\Gamma_{0km}^i = 0$  в силу равенства (29): все  $g_{0ik}$  – постоянные величины.

Перейдем к рассмотрению возмущенного состояния. Положим, в соответствии с теорией изгиба стержней:

$$y_*^{(1)} = -y \frac{dw}{dx}; \quad y_*^{(2)} \equiv w = w(x); \quad y_*^{(3)} = 0 \quad (34)$$

где введены обозначения

$$x^1 \equiv x; \quad x^2 \equiv y \quad (35)$$

В формулах (34)  $w$  – прогиб стержня. Найдем с учетом условия малости деформаций:

$$h_m^{(k)} = \begin{pmatrix} 1 + \alpha - yw'' & -w' & 0 \\ w' & 1 + \beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 + \gamma \end{pmatrix};$$

$$g_{ik} = \begin{pmatrix} 1 + 2\alpha - 2yw'' & 0 & 0 \\ 0 & 1 + 2\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 + 2\gamma \end{pmatrix};$$

$$G = 1 + 2(\alpha + \beta + \gamma) - 2yw''; \quad (36)$$

$$\sqrt{G} - \sqrt{G_0} = -yw'';$$

$$\partial_1 g_{11} = -2yw''; \quad \partial_2 g_{11} = -2w''$$

Остальные производные компонент метрического тензора равны нулю. Получаем ненулевые символы Кристоффеля и компоненты тензора малых деформаций и напряжений:

$$\Gamma_{*11}^1 = \Gamma_{11}^1 = -yw''; \quad \Gamma_{*11}^2 = \Gamma_{11}^2 = w''; \quad \varepsilon_{*11} = -yw''; \quad (37)$$

$$\sigma_*^{11} = \sigma_{*11} = -Eyw''$$

Вариации  $\delta r_k$  задаются в виде:

$$\delta r_1 = -y\delta w'; \quad \delta r_2 = \delta w \quad (38)$$



При этом для ненулевых вариаций деформаций получаются выражения:

$$\delta \varepsilon_{011} = -\gamma \delta w''; \quad (39)$$

$$\delta \varepsilon_{*11} = D_{*1} \delta r_1 = -\Gamma_{11}^n \delta r_n = \gamma^2 w''' \delta w' - w'' \delta w$$

Граничные условия задачи:

$$x=0, x=l: w=0; w''=0 \quad (40)$$

С учетом полученных соотношений уравнение (22) преобразуется к виду

$$\int_0^l dx \int_{-\frac{h}{2}}^{\frac{h}{2}} \left[ \gamma^2 w'' \delta w'' + \alpha (\gamma^2 w''' \delta w' - w'' \delta w) \right] dy = 0 \quad (41)$$

После интегрирования по  $y$  уравнение (41) принимает вид:

$$\int_0^l \left[ w'' \delta w'' + \alpha \left( w''' \delta w' - \frac{12}{h^2} w'' \delta w \right) \right] dx = 0 \quad (42)$$

Первое и второе слагаемые проинтегрируем по частям:

$$\int_0^l w'' \delta w'' dx = w'' \delta w' \Big|_0^l - w''' \delta w \Big|_0^l + \int_0^l w^{IV} \delta w dx; \quad (43)$$

$$\int_0^l w''' \delta w' dx = w''' \delta w \Big|_0^l - \int_0^l w^{IV} \delta w dx$$

С учетом граничных условий, допущения  $|\alpha| \ll 1$  и произвольности  $\delta w$  получается дифференциальное уравнение:

$$w^{IV} - \frac{12\alpha}{h^2} w'' = 0 \quad (44)$$

решение которого имеет вид:

$$w = A \sin \lambda x; \quad \lambda^2 = -\frac{12\alpha}{h^2} \quad (45)$$

Однородные граничные условия и требование существования нетривиального решения приво-

дят к решению задачи – формуле Эйлера для критической нагрузки:

$$\sin \lambda l = 0 \Rightarrow \lambda l = \pi \Rightarrow P = \frac{\pi^2 E F h^2}{12 l^2} \quad (46)$$

**Заключение.** Выше рассмотрена задача об устойчивости равновесия упругого тела как задача о бифуркации напряженно-деформированного состояния. Постановка задачи существенно упрощается за счет использования допущения о малости деформаций. Чтобы избежать необходимости введения дополнительных предположений, это допущение вводится не сразу, а на этапе перехода к уравнению в вариациях. В результате преобразований получается система однородных линейных дифференциальных уравнений с однородными граничными условиями. Условие существования нетривиальных решений приводит к уравнению, определяющему критическую нагрузку. Приведенный пример демонстрирует эффективность предложенного подхода.

#### Библиографический список

1. Вольмир, А.С. Устойчивость деформируемых систем. / А.С. Вольмир – М.: Наука, 1967. – 984 с.
2. Толоконников, Л.А. Вариационное уравнение задачи устойчивости состояния равновесия / Л.А. Толоконников // Изв. Тул. горн. ин-та. – 1961. – №3. – С. 27-38.
3. Гузь, А.Н. Устойчивость упругих тел при конечных деформациях. / А.Н. Гузь - Киев: Наукова думка, 1973. – 269 с.
4. Лурье, А.И. Нелинейная теория упругости. / А.И. Лурье - М.: Наука, 1970. – 940 с.
5. Лурье, А.И. Нелинейная теория упругости. / А.И. Лурье - М.: Наука, 1980. – 512 с.
6. Михлин, С.Г. Вариационные методы в математической физике. / С.Г. Михлин – М.: Наука, 1970. – 512 с.
7. Седов, Л.И. Механика сплошной среды. / Л.И. Седов – М.: Наука, – Т.1. – 1970. – 492 с.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Статья поступила в редакцию 30.09.2024; одобрена после рецензирования 17.12.2024; принята к публикации 17.12.2024.

The authors declare no conflicts of interests. The authors made an equivalent contribution to the preparation of the publication. The article was submitted 30.09.2024; approved after reviewing 17.12.2024; accepted for publication 17.12.2024.

# МАТЕРИАЛЫ КОНФЕРЕНЦИЙ

---

Материалы конференций

УДК 69

ГРНТИ: 67.09 Строительство и архитектура

ВАК: 1.1.8. Механика деформируемого твёрдого тела; 2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения; 2.1.5. Строительные материалы и изделия; 2.1.9. Строительная механика

doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_120

## НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ О ПРОВЕДЕНИИ XXV МЕЖДУНАРОДНОЙ НТК «АКТУАЛЬНЫЕ ПРОБЛЕМЫ СТРОИТЕЛЬСТВА И СТРОИТЕЛЬНОЙ ИНДУСТРИИ»

© Авторы 2024

SPIN: 8966-7812

ORCID 0000-0001-8601-4021

**ТРЕЩЕВ Александр Анатольевич**

член-корреспондент РААСН, доктор технических наук, профессор,  
заведующий кафедрой ССМиК

*РААСН; Тульский государственный университет  
(Россия, Тула e-mail: taa58@yandex.ru)*

SPIN: 4845-3197

**СЕЛЯЕВ Владимир Павлович**

академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции»

*РААСН; Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарёва  
(Россия, Саранск, e-mail: ntorm80@mail.ru)*

SPIN: 2090-4982

**ПЕТРОВ Владилен Васильевич**

академик РААСН, Заслуженный деятель науки РФ, доктор технических наук, профессор

*РААСН; Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.  
(Россия, Саратов, e-mail: vladilen307@gmail.com)*

SPIN: 1041-9513

**АНПИЛОВ Сергей Михайлович**

Заслуженный изобретатель РФ, доктор технических наук, профессор кафедры ЖБК

*Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет  
(Россия, Новосибирск, e-mail: anpilovsm@gmail.com)*

SPIN: 9629-5322

**РИМШИН Владимир Иванович**

член-корреспондент РААСН, Заслуженный строитель РФ, доктор технических наук, профессор

*НИИСФ РААСН; Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет  
(Россия, Москва, e-mail: v.rimshin@niisf.ru)*

SPIN: 2755-2105

**ТЕЛИЧКО Виктор Григорьевич**

доктор технических наук, доцент профессор кафедры ССМиК  
*Тульский государственный университет*

*(Россия, Тула, e-mail: kattranv@yandex.ru)*

**Аннотация.** В соответствии с распоряжением ректора О.А. Кравченко, с 26 по 28 июня 2024 года в Тульском государственном университете прошла юбилейная XXV Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии». Конференция прошла в смешанном формате: участники могли присутствовать лично или подключиться онлайн, а также опубликовать свои материалы в сборнике конференции. Конференция организована в рамках стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации на период до 2030 года, а также в рамках программы «Приоритет 2030». Организаторами конференции выступили: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации, Российская академия архитектуры и



строительных наук и Тульский государственный университет. Конференция «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» проводится ежегодно с 2000 года. Её цель — обсуждение проблем строительной отрасли, популяризация строительной науки и образования, а также привлечение молодёжи к научной деятельности. В ходе конференции были рассмотрены современные проблемы и задачи в области технологии строительных материалов, изделий и конструкций, теории проектирования зданий, сооружений, отдельных конструкций и их эксплуатации, исторические аспекты, а также проблемы современного образования по направлению «Строительство» всех уровней.

**Ключевые слова:** строительство; проблемы высшего образования; строительная механика; строительные материалы; строительные конструкции; проектирование; технология строительства

**Для цитирования:** Научный отчет о проведении XXV Международной НТК «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» / А.А. Трещев, В.П. Селяев, В.В. Петров, С.М. Анпилов, В.И. Римшин, В.Г. Теличко // Эксперт: теория и практика. 2024. № 4 (27). С. 120-126. doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_120.

Conference materials

### SCIENTIFIC REPORT ON THE XXV INTERNATIONAL STC "ACTUAL PROBLEMS OF CONSTRUCTION AND CONSTRUCTION INDUSTRY"

© The Author(s) 2024

**TRESHCHEV Alexander Anatolyevich**

Corresponding Member of the RAACS, Dr. of Technical, Prof.,  
Head of the Department of Construction, Building Materials and Structures  
RAACS; Tula State University  
(Russia, Tula, e-mail: taa58@yandex.ru)

**SELYAEV Vladimir Pavlovich**

Academician of RAACS, Honored Worker of Science of the Russian Federation,  
Dr. of Technical, Prof., Head of the Department of Building Structures  
RAACS; Mordovian State University named after N. P. Ogarev  
(Russia, Saransk, e-mail: ntorm80@mail.ru)

**PETROV Vladilen Vasilyevich**

Academician of RAACS, Honored Worker of Science of the Russian Federation,  
Dr. of Technical, Prof.  
RAACS; Yuri Gagarin State Technical University of Saratov  
(Russia, Saratov, e-mail: vladilen307@gmail.com)

**ANPILOV Sergey Mikhailovich**

Honored Inventor of the Russian Federation, Dr. of Technical, Prof.  
Novosibirsk State Architectural and Construction University  
(Russia, Novosibirsk, e-mail: anpilovsm@gmail.com)

**RIMSHIN Vladimir Ivanovich**

Corresponding Member of RAACS, Honored Builder of the Russian Federation,  
Dr. of Technical, Prof.  
RAACS; Moscow State University of Civil Engineering  
(Russia, Moscow, e-mail: v.rimshin@niisf.ru)

**TELICHKO Viktor Grigoryevich**

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department  
Tula State University  
(Russia, Tula, e-mail: katranv@yandex.ru)

**Abstract.** In accordance with the Rector's order, from June 26 to 28, 2024, Tula State University hosted the XXV International Scientific and Technical Conference on "Actual Problems of Construction and the Construction Industry". The conference was



held in a hybrid format, allowing participants to attend in person or remotely, as well as submit their papers for publication in conference proceedings. The conference was organized within the framework of the Strategy for the development of the construction industry and housing and communal services of the Russian Federation until 2030 and Priority 2030 program. It was organized by the Ministry of Science and Higher Education, Russian Academy of Architecture and Building Sciences, and Tula State University. The "Actual Problems of Construction" conference has been held annually since 2000. Its goal is to discuss problems in construction industry, promote construction science and education, and encourage young people to engage in scientific research. During the conference, modern issues and challenges in fields of building materials, products, structures technology, design theory, individual buildings and their operation, as well as historical aspects and current issues in education in "Construction" at all levels were discussed.

**Keywords:** construction; problems of higher education; construction mechanics; mechanics of materials; building materials; building structures; design; construction technology

**For citation:** Scientific report on the XXV International STC "Actual problems of construction and construction industry" / A.A. Treshchev, V.P. Selyaev, V.V. Petrov, S.M. Anpilov, V.I. Rimshin, V.G. Telichko // Expert: theory and practice. 2024. № 4 (27). Pp. 120-126. (In Russ.). doi:10.51608/26867818\_2024\_4\_120.

В очередной раз Тульский государственный университет стал местом проведения XXV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии».

В мероприятии приняли участие учёные и исследователи из разных городов России и других стран (всего из пяти стран). Конференция проходила с 26 по 28 июня 2024 года в смешанном формате: очно и заочно с публикацией материалов в сборнике конференции.

Юбилейная, 25-я по счёту конференция была организована в рамках стратегии развития строительной отрасли и жилищно-коммунального хозяйства России до 2030 года, а также в рамках программы «Приоритет 2030», в которой активно участвует Тульский государственный университет.

Конференция проводится с 2000 года с целью популяризации строительной науки и обсуждения проблем строительной отрасли и образования в целом, а также привлечения молодёжи к научной деятельности. В ходе конференции планировалось обсудить современные проблемы строительной науки, такие как технологии строительных материалов, изделий и конструкций, теория проектирования зданий, сооружений, отдельных конструкций и их эксплуатации, а также проблемы современного высшего образования по направлению «Строительство».

**Модератор и основной организатор Конференции**, ответственный за координацию и проведение: Трещев Александр Анатольевич – известный российский учёный, заместитель председателя Организационного комитета Конференции, член-корреспондент РААСН, Почетный строитель России, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, лауреат премии им. С.И. Мосина, лауреат премии им. И.А. Гришманова, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции» Тульского государственного университета.

**В качестве организаторов конференции выступили:** Министерство науки и высшего образования Российской Федерации (Минобрнауки РФ), Российская академия архитектуры и строительных наук (РААСН), а также федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тульский государственный университет» (ФГБОУ ВО «ТулГУ»).

**Участники конференции:** учёные и специалисты различных профилей из научно-образовательных организаций России, Узбекистана, Азербайджана, Туркменистана, Белоруссии и Сирии; сотрудники профессорско-преподавательского состава и руководители образовательных учреждений; специалисты-практики и руководители профильных организаций; докторанты, аспиранты, студенты (магистранты) вузов.

**Ключевые мероприятия в рамках проведения настоящей Конференции:**

- пленарное заседание конференции в онлайн формате 26 июня 2024 г.;
- заседание секции «Механика материалов и строительных конструкций, проектирование зданий и сооружений» 26 июня 2024 г.;
- заседание секции «Технология и экологические проблемы строительных материалов» 27 июня 2024 г.;
- заседание секции «Эксплуатация, обследование и усиление строительных конструкций» 27 июня 2024 г.;
- заседание секции «Проблемы современного высшего образования по направлению «Строительство» 28 июня 2024 г.;
- подготовка и публикация материалов Конференции в сборнике материалов Конференции (июль-август 2024 г.).

Всего в работе конференции приняло участие 70 представителей ВУЗов и других организаций, в том числе 7 магистрантов и 8 аспирантов. Всего участие в конференции приняли 19 ВУЗов, 4 акционерных общества из г. Тула и г. Москва, НИИ федерального уровня НИИСФ РААСН.



**Организации – участники конференции:**

**ВУЗы:**

- Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., г. Саратов, Россия;
  - Национальный исследовательский университет Московский государственный строительный университет, г. Москва, Россия;
  - Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, г. Москва, Россия;
  - Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия;
  - Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, г. Санкт-Петербург, Россия;
  - Тюменский индустриальный университет, г. Тюмень, Россия;
  - Уфимский государственный нефтяной технический университет, г. Уфа, Россия;
  - Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I, г. Санкт-Петербург, Россия;
  - Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия;
  - Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, г. Санкт-Петербург, Россия;
  - Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь, Россия;
  - Российский университет транспорта, г. Москва, Россия;
  - Казанский национальный исследовательский технологический университет, г. Казань, Россия;
  - Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орел, Россия;
  - Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия;
  - Тверской государственный технический университет, г. Тверь, Россия;
  - Институт математики и механики НАН Азербайджана, г. Баку, Азербайджан;
  - Туркменский государственный архитектурно-строительный институт, г. Ашхабад, Туркменистан;
  - Институт телекоммуникаций и информатики Туркменистана, г. Ашхабад, Туркменистан.
- Акционерные общества:**
- ООО «Строительное проектирование», г. Тула, Россия;
  - ООО «ПРОМСТРОЙ ИНЖИНИРИНГ», г. Москва, Россия;
  - ООО «ТГВ Инженерный сервис», г. Одинцово, Россия;
  - ООО «Конструкторское бюро «СмартПроект», г. Москва, Россия.

**Другие организации:**

- Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук (ФГБУ «НИИСФ РААСН»).

**Оргкомитет конференции:** председатель Кравченко О.А. - д.т.н., профессор, ректор ТулГУ; заместитель председателя Трещёв А.А. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой ССМИК ТулГУ; члены оргкомитета: **Моисеев В.А.** - президент АСРО ОПТО; Захарова И.А. - к.ф.-м.н., доцент; Теличко В.Г. - д.т.н., профессор; секретарь - к.т.н., старший преподаватель Кузнецова В.О.

**Программный комитет конференции.** Сопредседатели: Травуш В.И. - академик РААСН, д.т.н., проф., вице-президент РААСН (г. Москва); Акимов П.А. - академик РААСН, д.т.н., проф., ректор МГСУ (г. Москва); Колчунов В.И. - академик РААСН, д.т.н., проф., ЮЗГУ (г. Курск); Петров В.В. - академик РААСН, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов); Селяев В.П. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГУ (г. Саранск).

**Члены программного комитета:**

- Анпилов С.М. - советник РААСН, д.т.н., проф., НГАСУ (г. Новосибирск);
- Белов В.В. - советник РААСН, д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь);
- Белостоцкий А.М. - академик РААСН, д.т.н., проф., ООО «СтаДиО» (г. Москва);
- Ерофеев В.Т. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГУ (г. Саранск);
- Монастырев П.В. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., ТГТУ (г. Тамбов);
- Мондрус В.Л. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);
- Меркулов С.И. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., КГУ (г. Курск);
- Зубчанинов В.Г. - д.т.н., проф., ТверьГТУ (г. Тверь);
- Овчинников И.Г. - академик АТ, д.т.н., проф., СГТУ (г. Саратов);
- Римшин В.И. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);
- Румянцева В.Е. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., ИГПУ (г. Иваново);
- Сидоров В.Н. - академик. РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва).
- Соколова Ю.А. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва).
- Федосов С.В. - академик РААСН, д.т.н., проф., МГСУ (г. Москва);
- Черкасов В.Д. - чл.-корр. РААСН, д.т.н., проф., МГУ (г. Саранск);
- Mueller W.H. - д.е.н., проф., Берлинский техн. ун-т (г. Берлин, Германия).

**Тематические секции конференции:** состав секций юбилейной конференции повторяет предыдущие годы – «Механика материалов и строительных кон-



струкций, проектирование зданий и сооружений», «Технология и экологические проблемы строительных материалов», «Эксплуатация, обследование и усиление строительных конструкций», «Проблемы современного высшего образования по направлениям «Строительство».

Торжественное открытие конференции состоялось в аудитории 407 8-го учебного корпуса Тульского государственного университета. Со вступительным словом и поздравлениями к участникам конференции обратился заместитель председателя Организационного комитета Конференции, член-корреспондент РААСН, Почетный строитель России, Почетный работник высшего профессионального образования РФ, лауреат премий им. С.И. Мосина, им. И.А. Гришманова, эксперт РАН, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции» (ССМиК) Тульского государственного университета Трещев Александр Анатольевич. Трещев А.А. особо отметил факт ежегодного проведения конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» на базе кафедры ССМиК в течение уже четверти века, а также постоянный рост количества и географии участников и гостей, рекордный объем представленных в программный комитет Конференции материалов. Также была отмечена важность международного сотрудничества и взаимодействия с государственными академическими институтами в лице РААСН.

После вступительного слова, участники конференции перешли к обсуждению тем, указанных в плане мероприятия.

С докладом о складывающейся ситуации в строительной отрасли Тульской области, а также развитии строительного проектирования и отрасли в целом, выступил генеральный директор АО «Тулаоргтехстрой» (г. Тула), президент ассоциации «Саморегулируемая организация «Объединение проектировщиков тульской области» (АСРО «ОПТО») Моисеев Владимир Алексеевич.

С докладом, посвященным научно-исследовательской деятельности сотрудников кафедры ССМиК, сотрудничеству и перспективам раннего привлечения студентов к научной работе в области строительства, решению кадровых проблем в образовательной отрасли, выступил д.т.н., профессор кафедры ССМиК ТулГУ, ведущий научный сотрудник Высшей школы строительного материаловедения Академии развития строительного комплекса ВГТУ (г. Воронеж) Теличко Виктор Григорьевич.

О сотрудничестве между предприятиями строительной отрасли г. Москвы и г. Тулы, о расширении деятельности проектных организаций в г. Тула, рассказал к.т.н., доцент кафедры ССМиК, а по совместительству главный специалист ООО «Промстрой инжиниринг» (г. Москва) Делягин Михаил Юрьевич.

О взаимодействии и совместной работе кафедр Института горного дела и строительства (ИГДиС) ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет», рассказал исполняющий обязанности заведующего кафедрой «Механики материалов и геотехнологий», участник Евразийской ассоциации по сейсмологии и сейсмостойкому строительству д.т.н., профессор Сергей Владимирович Анциферов.

Слово для доклада было предоставлено аспирантам кафедры «Строительства, строительных материалов и конструкций». С докладами, посвященными развитию и практическому применению теории деформирования материалов чувствительных к виду напряженного состояния, активно развиваемой научной школой кафедры ССМиК, выступили – Чигинская И.А., тема доклада «Результаты определения НДС оболочечной конструкции из изотропных разнотолщинных материалов методом конечных элементов в условиях термомеханического воздействия» (научный руководитель д.т.н., проф. Теличко В.Г.); Дорошенко Д.И., тема доклада «Термомеханическое деформирование ортотропной сферической оболочки с отверстием» (научный руководитель д.т.н., проф. Трещев А.А.); Бесстрашнов Д.О., тема доклада «Математическая модель основания из ортотропных слоев с учетом их деформационной псевдоеднородности» (научный руководитель д.т.н., проф. Трещев А.А.); Ющенко Н.С., тема доклада «Изгиб прямоугольных пластин средней толщины из ортотропного нелинейно разнотолщинного материала» (научный руководитель д.т.н., проф. Трещев А.А.).

С докладами выступили магистранты различных кафедр ИГДиС ТулГУ: Ермаков А.Ю. «Особенности определения расчетного сопротивления деревянных конструкций по нормам ЕВРОКОД 5 в сравнении с СП 64.13330.2017», Леончев А.А. «Основные приоритетные направления улучшения свойств гипсовых вяжущих», Яхонтова Л.О. «Зависимость формовочных свойств ГЦПВ от поверхностно-активных веществ в составе», Медведева М.М. «Исследование взаимодействия грунта и обделки тоннеля, сооруженного под защитой экрана из труб», Фурсова А.С. «Напряженное состояние грунта вокруг выработки, пройденной вблизи склона» и другие.

Также, с докладами выступили: доцент кафедры ССМиК Батырев К.Г., тема «Численное моделирование для оценки несущей способности буронабивных свай: преодоление отступлений от требований СП и ГОСТ на полевые испытания»; доцент кафедры ССМиК Захарова И.А. – тема доклада «Методическое сопровождение изучения опыта моделирования в современных САЕ-системах»; доцент кафедры ССМиК Сергеева С.Б. – тема доклада «Особенности преподавания дисциплины «технология отделочных и изоляционных» строительных материалов и изделий».



Отдельно стоит отметить доклад старшего преподавателя кафедры ССМИК Кузнецовой В.О. о роли личности современного педагога в образовании, в частности, в высшей школе.

Дистанционно с докладами выступили: к.т.н., доцент кафедры «Строительных конструкций, оснований и фундаментов имени профессора Ю.М. Борисова» ФГБОУ ВО ВГТУ Левченко А.В. «Моделирование соединений слоев 3D-печатной конструкции с помощью технологии CZM» (г. Воронеж); д.т.н., профессор кафедры «Конструкций и сооружений» ФГБОУ ВО ТГТУ «Методика проведения экспериментальных исследований по проверке постулата изотропии материала А.А. Ильюшина» (г. Тверь); соискатель по кафедре «Строительной и теоретической механики» НИУ МГСУ Зоненберг А.Л. «Нестационарные задачи для стержней на основе теории С.П. Тимошенко при мгновенных воздействиях» (г. Москва); представитель Азербайджана Мир-Салим-заде М.В. «Институт математики и механики НАН» «Зарождение трещин в стрингерной пластине, ослабленной бесконечным рядом круговых отверстий» (г. Баку); преподаватели ТГАСИ Ормедов Т.С., Рахманова А. А. «Особенности газобетонных изделий в строительном производстве» (г. Ашхабад, Туркменистан); преподаватели ТГАСИ Мередова Х.А., Курбанова М.А., Ашыров А.И. «Уникальные тайны Небесного минарета» – минарет Кутлуг-Тимура (древний город Кёнеургенч).

Всего на Конференции было представлено 59, одобренных представительным программным комитетом, докладов. Было принято решение всем участникам Конференции выдать сертификаты участия, подтверждающие их участие в Конференции.

По итогам юбилейной Конференции участниками было приняты следующие решения:

1. Ежегодные конференции, проводимые кафедрой «Строительство, строительные материалы и конструкции», включая очные мероприятия, представляют собой платформу для демонстрации инновационных тенденций в строительной науке. На них обсуждаются новые достижения в области производства строительных материалов и технологий, а также обсуждаются вопросы развития современного образования в сфере строительства как в России, так и на международном уровне.

2. Кафедра «Строительство, строительные материалы и конструкции» подготовила и связана с обширной сетью квалифицированных специалистов, работающих на предприятиях и в проектных организациях региона. Кроме того, она располагает высококвалифицированными научными кадрами, что позволяет ей оказывать поддержку заинтересованным компаниям и организациям в теоретических разработках и проектировании строительных сооружений, технологий строительных материалов, а также в обследовании и усилении строительных конструкций. Успехи, достигнутые в

этой области, делают участие в конференциях привлекательным для широкого круга учёных и специалистов.

3. Конференция предоставила возможность всем, кто заинтересован в развитии строительной науки и практики, представить свои доклады и сообщения, а также получить информацию о новых теоретических разработках, инновационных технологиях и оборудовании. Это способствует развитию не только участников конференции, но и всей строительной отрасли.



Рис. 1. Обложка сборника с материалами юбилейной Конференции

4. По итогам международной конференции было принято решение опубликовать сборник материалов. Доклады, отобранные программным комитетом, будут доработаны и опубликованы в журнале «Эксперт: теория и практика» АНО «ИССТЭ», который входит в перечень ВАК по научным специальностям 1.1.8 «Механика деформируемого твердого тела», 2.1.1 «Строительные конструкции, здания и сооружения», 2.1.5 «Строительные материалы и изделия», 2.1.9 «Строительная механика».

5. По итогам проведения конференции подготовлен к публикации сборник материалов (см. рис. 1), представленных участниками XXV Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы строительства и строительной индустрии» с рекордным объемом 396 страниц.

#### Библиографический список

1. Анпилов, С.М. Пути прогресса и развития в науке / С. Анпилов. – Тольятти : Автономная Некоммерческая Организация "Институт судебной строительно-технической экспертизы", 2021. – 186 с. – ISBN 978-5-6044616-2-4. – DOI 10.51608/9785604461624. – EDN YTOIRW.



2. Березин, А.В. Деформирование материалов с приобретаемой физической или механической поврежденностью: монография / А.В. Березин, В.Ю. Жиркевич, А.А. Трещев. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2020. – 401 с.
3. Березин, А.В. Трещины в разноспротивляющихся дилатирующих материалах / А.В. Березин // Упругость и неупругость. – М.: Изд-во Моск. гос. ун-та. – 2011. – С. 304–307.
4. Голдфельд, И.З. Практика расширенного анализа результатов полевых испытаний грунтов сваями и зондированием / И.З. Голдфельд // Международный научно-практический журнал «Геотехника». - 2013. - № 3. - С. 48-66.
5. Концепция подготовки кадров для строительной отрасли до 2035 года. Проект (по состоянию на 17 октября 2022 г.). - М.: НИУ МГСУ, 2022.
6. Матченко, Н.М. Теория деформирования разноспротивляющихся материалов. Прикладные задачи теории упругости / Н.М. Матченко, А.А. Трещёв // Прикладные задачи теории упругости. - М.; Тула: РААСН; ТулГУ, 2004. - 211 с.
7. Методические рекомендации по реализации дополнительных профессиональных программ с использованием дистанционных образовательных технологий, электронного обучения и в сетевой форме: Приложение к письму Министерства образования и науки Российской Федерации от 21 апреля 2015 г. № 1013/06 «О направлении методических рекомендаций по реализации дополнительных профессиональных программ».
8. Овчинников, И.Г. Защита от коррозии металлических и железобетонных мостовых конструкций методом окрашивания: научно-техническое издание / Овчинников И.Г., Ликверман А.И., Распоров О.Н. [и др.]. // Саратов: Изд-во Саратовский полиграфкомбинат - 2014 - 503 с.
9. Овчинников, И.И. Моделирование и оптимальное проектирование круглых пластинок, взаимодействующих с агрессивными средами: монография / И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников. - Тюмень: ТИУ, 2023. - 198 с.
10. Римшин, В. И. Техническое обследование несущих конструкций с моделированием напряженно-деформированного состояния конструкций / В. И. Римшин, П. С. Трунгов // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 2(21). – С. 89-94. – DOI 10.51608/26867818\_2023\_2\_89. – EDN EDUVOT.
11. Семенов, В.А. Выбор расчетных моделей пространственных комбинированных систем МКЭ // Пространственные конструкции зданий и сооружений: Сб. статей. под ред. В.В. Шугаева и др. - М. 2004. - Вып. 9. - С. 54-64.
12. Теличко, В.Г. Гибридный конечный элемент для расчета плит и оболочек с усложненными свойствами / В.Г. Теличко, А.А. Трещев // Известия вузов. Строительство. - 2003. - № 5. - С. 17-23.
13. Третьякова, Е.Г. Храмовые здания из быстровозводимых блок-модулей в сейсмически активных районах Сибири и Дальнего Востока на примере Забайкальского региона // Известия Петербургского университета путей сообщения. - СПб. ПГУПС, 2023. - Т. 20. - Вып. 3. - С. 614- 632. DOI: 10.20295/1815-588X-2023-3-614-632
14. Atagarryýew, Ý. Türkmenistanyň gadymy şäherleri / Ý. Atagarryýew-A.: Magaryf, 1974. - 112 s.
15. Berdimuhamedow, S.G. Ýaşlar-watanyň daýanjy. - A., Türkmen döwlet-neşirýatgullugy. 2023. - 418 s.
16. Bert, C.W. Bending of Thick Rectangular Plates Laminated of Bimodulus Composite Materials / C.W. Bert, J.N. Reddy, W.C. Chao // AIAA Journal. - 1981. - Vol. 19. - № 10. - P. 1342-1349.
17. Eurocode 5: Design of timber structures - Part 1-1: General - Common rules and rules for buildings: EN 1995-1-1:2004+A1:2004. - Introduced 16.04.04. - Brussel: European Committee for standardization, 2004. - 121 p.

Статья поступила в редакцию 14.09.2024; принята к публикации 02.12.2024.

The article was submitted 14.09.2024; accepted for publication 02.12.2024.

## 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 **Инديзайне** или загрузке в **РИНЦ** (*они видят всё*) у вас в статье будет обнаружено замена одноплатных 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 – 0,64)

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);
- 5.1. – Право (социальные и гуманитарные науки).

Размещение статей в сетевом издании платное.

**Оплата производится** после получения вами **сообщения** о приеме статьи к публикации, после чего автором высылается скриншот или фото оплаты через Сбербанк-онлайн или через другие банки-онлайн на адрес сетевого издания: [expert763@mail.ru](mailto:expert763@mail.ru)

Статью высылать по адресу: [expert763@mail.ru](mailto:expert763@mail.ru)

#### Структурные параметры:

*Статья обязательно должна иметь элементы, отвечающие следующим параметрам:*

**1. Метаданные статьи** на русском и английском языках (научная специальность, УДК, DOI, название статьи, знак копирайта (авторского права), **все научные идентификаторы автора**, ФИО автора полностью, должность, организация, адрес организации, личная электронная почта, аннотация и ключевые слова) – **не проверяются на антиплагиат**.

#### **2. Тело статьи:**

ВВЕДЕНИЕ

*Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными научными и практическими задачами*  
**(кратко описывается проблема исследования и значение ее решения)**

*Анализ последних исследований и публикаций, в которых рассматривались аспекты этой проблемы и на которых обосновывается автор; выделение неразрешенных ранее частей общей проблемы.*

**(указаны общие тенденции в том, что уже было опубликовано, указано на отдельную проблему или на перспективу развития по данной тематике)**

*Обосновывается актуальность исследования.*

**(подтверждена актуальность исследования, указано практическое значение статьи и ее вклад в науку)**

МЕТОДОЛОГИЯ

*Формирование целей статьи.*

**(указывается цель статьи)**

*Используемые методы, методики и технологии.*

**(а) описание методов, которые вы применяли конкретно для статьи, если теоретическая статья, то выбрать один метод и описать его методологию, теорию, историю, конкретно какие принципы этого метода применяли к данному исследованию;**

**б) описание этапов эксперимента, в) описание участников эксперимента (возраст, пол, вузы и какие площадки были охвачены)**

РЕЗУЛЬТАТЫ

*Изложение основного материала исследования с полным обоснованием полученных научных результатов.*

**(а) раскрыто новшество статьи, описаны авторские наблюдения и результаты;**

**б) представленные результаты соответствуют заявленным целям и задачам статьи;**



- в) описана идея, концепция, методика, которая нашла применение (конкретика);
- г) представлены результаты в виде таблиц и рисунков - названия таблиц и рисунков отвечают содержанию таблиц и рисунков)

#### ОБСУЖДЕНИЕ

*Сравнение полученных результатов с результатами в других исследованиях.*

- (а) сравнили различные методы, сравнили результаты исследования с аналогичными в других статьях;
- б) написали о различиях или сходстве (или и о различиях, и о сходстве);
- в) сделали разбор и разъяснение результатов;
- г) сделали обобщение и оценку результатов, сделали оценку достоверности полученных результатов;
- д) определили место полученных в ходе исследования результатов в структуре известных знаний)

#### ВЫВОДЫ

*Выводы исследования.*

(подводится итог статьи, указываются результаты, к которым пришли в результате проведенного исследования)

*Перспективы дальнейших изысканий в данном направлении.*

(указываются направления, по которым необходимо провести дальнейшие исследования)

#### 3. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (не проверяется на антиплагиат).

(рекомендуется в списке литературы не менее 15 источников, 5 из которых за последние 5 лет (в 2023 году - это статьи 2019-2023 годов).

#### Технические параметры:

Названия файла:

- Фамилия город (например: **Иваненко Самара**)

Общий объем: 5-9 страниц печатанного текста формата А-4 (до списка литературы).

Стандарты: шрифт Times New Roman, **кегель – 14**, междустрочечный **интервал – 1,5**, абзацный отступ – **1 см** (это сделано для того, чтобы автор точно знал сколько страниц текста у него будет в журнале), все поля – **2 см**, литература – **В ПОРЯДКЕ ПОЯВЛЕНИЯ В ТЕКСТЕ** (желательно не менее 15 наименований, из них 5 (рекомендуется) – за последние 1-5 лет), редактор Word, тип файла – документ **Word 97-2003** (обязательно).

**Ключевые слова** (не менее 8 слов) и **аннотация** (не менее 150-200 слов) на русском и английском.

Неразрывные пробелы между цифрами, инициалами и фамилией.

Не путать тире (–) и дефис (-).

Формулы необходимо набирать в файле формата **Microsoft Word 2010** (используя опции "Вставка -> Формула"), а потом сохранять в **Word 97-2003**, в таком случае формулы становятся как картинки), размер символа - **10** (обязательно), длина формул не должна превышать **80 мм** (обязательно), латинские символы набираются курсивом, греческие – прямым шрифтом, **КИРИЛЛИЦА НЕ ДОПУСКАЕТСЯ**.

Рисунки, выполненные векторной графикой, должны быть помещены одним объектом или сгруппированы.

Сканированные рисунки исполнять с отдельной возможностью не менее 300 dpi.

#### Справочная информация:

1. Для определения УДК можно использовать следующие ссылки:

А) <http://teacode.com/online/udc/>

Б) <http://www.naukapro.ru/metod.htm>

2. Для проверки статьи на антиплагиат (проверка обязательна **в системе АнтиплагиатВУЗ** – все остальные дают неверные показатели) ссылка (оригинальность текста статьи должна быть не менее 75%, *в тексте статьи должно быть не менее 8000 и не более 40000 знаков без пробелов*):

А) <https://www.antiplagiat.ru/> (результаты хранятся у автора и высылаются по запросу редколлегии)

Статьи в обязательном порядке размещаются в системе РИНЦ – российского индекса научного цитирования (elibrary, ссылка: <http://elibrary.ru/titles.asp>), НЭБ КиберЛенинка (ссылка: <https://cyberleninka.ru>) и на сайте журнала.

Сетевое научно-практическое издание

**ЭКСПЕРТ: ТЕОРИЯ И ПРАКТИКА**  
**№ 4 (27) 2024 г.**

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

---

Scientific and Practical Online Edition

**EXPERT: THEORY AND PRACTICE**  
**№ 4 (27) 2024**

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](mailto:anna.sarachai@gmail.com)

Подписано для публикации на сайте <http://expert763.ru> 23.12.2024.  
Формат 60x84/8. Усл.-печ. л. 15,11.  
Электронные текстовые данные (8,79 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>, [expert763@mail.ru](mailto:expert763@mail.ru).

